

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

Statická deformace a namáhání předepnuté železniční podkladnice

The Static Deformation and Loading of the Pre-stressed Rail
Seating

Student:

Šárka Michenková

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechaniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Šárka Michenková

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Statická deformace a namáhání předepnuté železniční podkladnice
The Static Deformation and Loading of the Pre-stressed Rail Seating

Zásady pro vypracování:

1. Popis funkce podkladnice.
2. Rozbor zatížení, popis experimentů.
3. Modelování a výpočty.
4. Interpretace výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

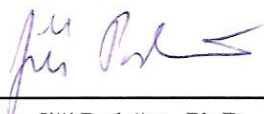
- [1] Kolář V., Kratochvíl J., Leitner F., Ženíšek A. : Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků. SNTL, Praha 1979.
- [2] Kolář V., Němec I., Kanický V. : FEM Principy a praxe metody konečných prvků. Computer Press, 1997.
- [3] Crisfield M. A. - Non-linear finite element analysis of solids and structures. John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, 1997.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít toto dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis

Šárka Michenková

Na Zadkách 84/16

739 32 Vratimov

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MICHENKOVÁ, Š. *Statická deformace a namáhání předepnuté železniční podkladnice : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2011, 49 s. Vedoucí práce: Podešva, J.

Bakalářská práce se zabývá statickou deformací a namáháním předepnuté železniční podkladnice využívané za účelem zvětšení kontaktní plochy mezi kolejnicí a pražcem. Na začátku této práce je popsán rozbor všech zatížení působící na podkladnici a popis experimentu pro výpočet deformací a namáhání předepnuté podkladnice. V další části se práce zabývá modelováním jednotlivých prvků modelu. Modelování, dále i výpočty předepnutí a namáhání podkladnice metodou konečných prvků jsou prováděny pomocí programu Ansys. Nakonec je uvedeno zhodnocení výsledků.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MICHENKOVÁ, Š. *The Static Deformation and Loading of the Pre-stressed Rail Seating : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2011, 49 p. Thesis head: Podešva, J.

The bachelor thesis deals with the static deformation and loading of the pre-stressed rail seating used to increase the contact surface between the rail and sleeper. At the beginning of this work describes the analysis of loads on the base plates and a description of the experiment to calculate the deformation and stress prestressed plates. In another part of the work deals with modeling individual elements of the model. Modeling and calculations of stress and prestress plates the finite element method are performed using software ANSYS. Finally, it is stated evaluation results.

OBSAH

Seznam použitých značek a symbolů	7
1. Úvod	8
2. Funkce železniční podkladnice	9
3. Rozbor zatížení působící na podkladnici	10
3.1 První zatěžovací stav	10
3.2 Druhý zatěžovací stav	10
4. Popis experimentů	11
4.1 Experimentální určení modulu pružnosti pryží	11
4.2 Experimentální určení předepnutí pražcových šroubů	12
5. Metodika modelování	14
5.1 Symetrie	14
5.2 Ocelové díly	15
5.2.1 Podkladnice	15
5.2.2 Kolejnice	16
5.2.3 Pražcové šrouby	17
5.3 Pryžové podložky	18
5.4 Kontakty	20
6. Výpočty	21
6.1 Výpočet modulu pružnosti pryží	21
6.1.1 Pryžová podložka pod podkladnici	21
6.1.2 Pryžová podložka pod kolejnici	24
6.2 Výpočet předpětí v pražcovém šroubu	27
6.2.1 Varianta A – BONDED	28
6.2.2 Varianta B – FRICTIONAL 0,3	30
6.3 Výpočet napětí na podkladnici	33
6.3.1 Varianta A – BONDED	33
6.3.2 Varianta B – FRICTIONAL 0,3	38
7. Zhodnocení výsledků	43
8. Závěr	45
Seznam použité literatury	46
Přílohy	47

Seznam použitých značek a symbolů

a, b	[mm]	strany pryže
d_2	[mm]	střední průměr závitu
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	síla
F_o	[N]	osová síla šroubu
F_p	[N]	předpětí ve šroubu
f_t	[-]	koefficient tření
f_z	[-]	součinitel smykového tření
h_o	[mm]	výška pryže
M_u	[Nm]	utahovací moment šroubu
P	[MPa]	tlak
Ph	[mm]	stoupání závitu
S	[mm ²]	plocha pryže
x	[N]	zatížení F
y	[mm]	deformace Δh
α	[°]	úhel stoupání závitu
Δh	[mm]	deformace pryže
ε	[-]	poměrná deformace pryže
σ	[MPa]	napětí
μ	[-]	Poissonovo číslo
φ'	[°]	redukovaný třecí úhel
ψ	[°]	úhel stoupání závitu

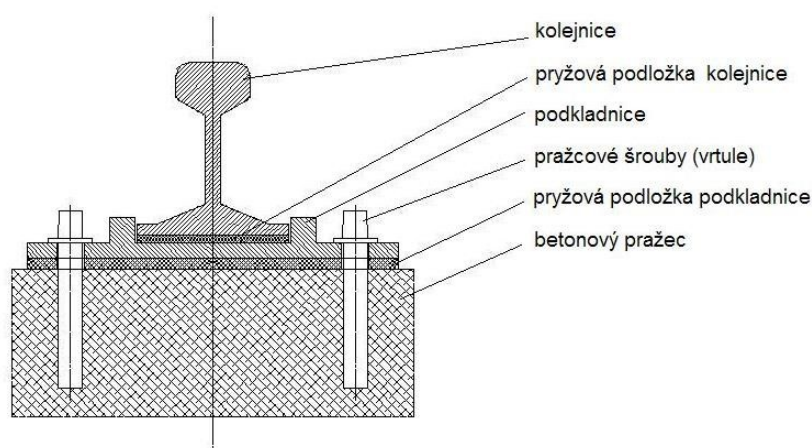
1. Úvod

Železniční doprava je jedním z nejúčinnějších prostředků používaných pro přepravu osob či různých nákladů. Je to kolejová doprava provozována na železniční dráze. Proti silniční dopravě se kolejová doprava vyznačuje nízkou spotřebou energie. Je to dáno nízkým valivým odporem soustavy kolo – kolejnice. Železniční svršek je jedna ze základních součástí kolejové trati. Tvoří jízdní dráhu, která vozidlo nese a vede. Základní části železničního svršku jsou kolejnice, výhybky, podkladnice, upevňovadla, pražce a kolejové lože.

Tato práce se bude zabývat problematikou statické deformace a namáháním předepnuté železniční podkladnice. Nejprve se zaměří na rozbor dvou vzniklých zatěžovacích stavů, které vzniknou utažením podkladnice k betonovému pražci, a v druhém stavu se navíc přidá zatížení od přejezdu vozidla po kolejnici. Dále se bude zabývat výpočtem vlastností pryží, a to konkrétně modulem pružnosti pryžové podložky pod podkladnicí a pod kolejnici. Potom bude následovat výpočet předepnutí pražcových šroubů (vrtulí), které vznikne při utažení určitým utahovacím momentem. Cílem této práce je zhodnotit namáhání, které vznikne ve dvou zmíněných zatěžovacích stavech.

2. Funkce železniční podkladnice

Podkladnice je ocelová deska, která je uložena mezi kolejnicí a pražcem. Pro zajištění pružného uložení kolejnice se vkládá mezi její patu a podkladnici, dále mezi podkladnici a pražec pružná podložka z tvarové pryže. Výhodou pružných podložek jsou menší nároky na údržbu, jednodušší montáž a větší odolnost proti uvolňování následkem dynamických účinků vozidel na trať.



Obr. 2.1 – Zjednodušené schéma pružného uložení kolejnice

Úkolem železniční podkladnice je zvětšit kontaktní plochu mezi kolejnicí a pražcem, která roznáší provozní tlaky a dynamické účinky a tím zmenšuje specifické tlaky na podklad, což vede k prodloužení životnosti pražců.



Obr. 2.2 – Uložení kolejnice na betonovém pražci

3. Rozbor zatížení působící na podkladnici

Na podkladnici působí dva zatěžovací stavy. První zatěžovací stav vzniká v důsledku utažení nezatížené podkladnice pomocí pražcových šroubů tzv. vrtulí k betonovému pražci. V okamžiku průjezdu vozidla po kolejnici vzniká druhý zatěžovací stav.

3.1 První zatěžovací stav

Pražcové šrouby jsou utaženy utahovacím momentem 200 Nm a na kolejnici nepůsobí žádné zatížení. Podkladnice je předeprnuta a dochází k její ohybové deformaci. V místech utažení je tlačena k betonovému pražci a uprostřed se prohýbá směrem vzhůru v důsledku působení tlaku pryžové podložky. Při tomto stavu bude napětí největší.



Obr. 3.1 – První zatěžovací stav podkladnice

3.2 Druhý zatěžovací stav

Pražcové šrouby jsou utaženy utahovacím momentem 200 Nm a na kolejnici působí zatížení od vozidla 95 kN. Toto zatížení kolejnice se přenáší jako tlak na střed podkladnice. Při opakovaném přejezdu vozidla po kolejnici je podkladnice namáhána cyklickým ohybem. V okamžiku, kdy nastane druhý zatěžovací stav, se podkladnice oproti prvnímu zatěžovacímu stavu vyrovná a napětí se zmenší.



Obr. 3.2 – Druhý zatěžovací stav podkladnice

4. Popis experimentů

Cílem experimentu je vypočítat naměřené deformace na podkladnici, které byly změřené na katedře Částí a mechanismů strojů strojí fakulty VŠB – TU Ostrava, na vytvořeném modelu u obou zatěžovacích stavů, aby se mohlo určit napětí na podkladnici. Známy je utahovací moment pražcových šroubů a zatížení působící na kolejnici způsobené přejezdem vlaku. Pomocí experimentu určujeme pro daný utahovací moment odpovídající předpětí ve šroubu. Protože není znám přesný modul pružnosti pryží E , je nutné z naměřených hodnot přibližně určit tuhost daných pryží. V následujících podkapitolách jsou postupy podrobněji popsány.

4.1 Experimentální určení modulu pružnosti pryží

Pro pryžovou podložku pod kolejnici ve variantě RN-R65-01-č.4/ORIG/SM400 a pro pryžovou podložku pod podkladnici ve variantě PP-GZ/DT-V1/P-č.1/SM400 se na katedře Částí a mechanismů strojů provedly zkoušky statických parametrů pryžových podložek.

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
katedra Částí a mechanismů strojů

PROTOKOL

o zkoušce statických parametrů pryžové podložky pod kolejnici
evidenční číslo

RN-R65-01-č.4/ORIG/SM400

Zákazník	
Zatížení	1 kN až 95 kN
Teplota vzorku	$+20 \pm 2$ °C
Teplota v laboratoři	$+20 \pm 2$ °C

Datum zkoušky	20. 11. 2001 14:46
Rychlost zatěžování	1.6 ± 0.3 kN/s
Vlhkost vzduchu	50 ± 10 %
Výška vzorku h_0	7.0 mm

Zatížení	Deformace	Poměrné stlačení	Okamžitá tuhost
$P_{(i)}$	$\Delta h_{(i)}$	$\varepsilon_{(i)}$	$C_{SO(i)}$
kN	mm	%	kN/mm
10	0.13	1.85	77.17
20	0.27	3.81	75.01
30	0.39	5.51	77.83
40	0.49	7.01	81.48
50	0.58	8.33	85.71

Zatížení	Deformace	Poměrné stlačení	Okamžitá tuhost
$P_{(i)}$	$\Delta h_{(i)}$	$\varepsilon_{(i)}$	$C_{SO(i)}$
kN	mm	%	kN/mm
60	0.66	9.45	90.70
70	0.73	10.38	96.29
80	0.78	11.16	102.43
90	0.83	11.84	108.57
95	0.85	12.19	111.32

Obr. 4.1 – Změřené hodnoty pro pryžovou podložku pod kolejnici

PP-GZ/DT-V1/P-č.1/SM400

Zákazník		Datum zkoušky	20.11.2001 9:21
Zatížení	1 kN až 95 kN	Rychlost zatěžování	1.6 ± 0.3 kN/s
Teplota vzorku	20 ± 2 °C	Vlhkost vzduchu	50 ± 10 %
Teplota v laboratoři	20 ± 2 °C	Výška vzorku h_0	11.5 mm

Zatížení	Deformace	Poměrné stlačení	Okamžitá tuhost	Zatížení	Deformace	Poměrné stlačení	Okamžitá tuhost
$P_{(i)}$	$\Delta h_{(i)}$	$\epsilon_{(i)}$	$C_{so(i)}$	$P_{(i)}$	$\Delta h_{(i)}$	$\epsilon_{(i)}$	$C_{so(i)}$
kN	mm	%	kN/mm	kN	mm	%	kN/mm
10	0.13	1,85	77,17	60	0.66	9,45	90,70
20	0.27	3,81	75,01	70	0.73	10,38	96,29
30	0.39	5,51	77,83	80	0.78	11,16	102,43
40	0.49	7,01	81,48	90	0.83	11,84	108,57
50	0.58	8,33	85,71	95	0.85	12,19	111,32

Obr. 4.2 – změřené hodnoty pro pryžovou podložku pod podkladnicí

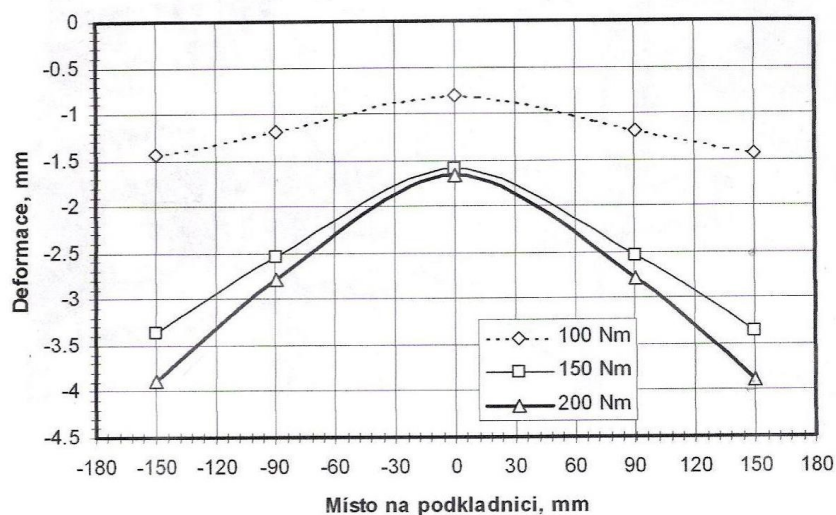
Z těchto naměřených hodnot se sestavily v programu Microsoft Excel grafy v závislosti zatížení na deformaci obou pryží. Pomocí regrese se vygenerovala rovnice pro lineární regresní křivku. Z regresní rovnice a dalších vztahů se vypočítal modul pružnosti jednotlivých pryží pro lineární závislost. Linearizace pryží se provádí pro zjednodušení dané soustavy. Dále, aby se výpočtem dosáhlo naměřených hodnot deformace podkladnice v prvním a v druhém zatěžovacím stavu prováděly se opakované výpočty s případným snižováním nebo zvyšováním modulu pružnosti pryží do doby, kdy výsledky souhlasily s naměřenými hodnotami.

4.2 Experimentální určení předepnutí pražcových šroubů

Podkladnice k betonovému pražci je utažená pomocí šroubů. Potřebujeme zjistit předpětí ve šroubu, které vznikne při utažení utahovacím momentem $M_u = 200$ Nm. Experiment spočívá v dosazování různých hodnot předpětí šroubu při opakovaných výpočtech. Hodnota předpětí se mění i v závislosti na modulu pružnosti pryžové podložky pod podkladnicí. Dosažením naměřených hodnot deformací na daných místech podkladnice provedené katedrou Částí a mechanismů strojů strojní fakulty VŠB – TU Ostrava se na vymodelované součásti zjistí skutečné hodnoty předpětí ve šroubu. Nakonec zjistíme napěťový stav podkladnice v obou zátěžových stavech pomocí konečného výpočtového doladění předpětí a tuhostí pryží.

Tab. 12.1 - Hodnoty posunutí měřicích míst při utažení vrtulí [mm]

Poloha měření	Vrtule	Žebro	Střed	Žebro	Vrtule
Utažení	-150	-90	0	90	150
0 Nm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100 Nm	1.44	1.19	0.81	1.19	1.44
150 Nm	3.35	2.54	1.59	2.54	3.35
200 Nm	3.89	2.79	1.66	2.79	3.89



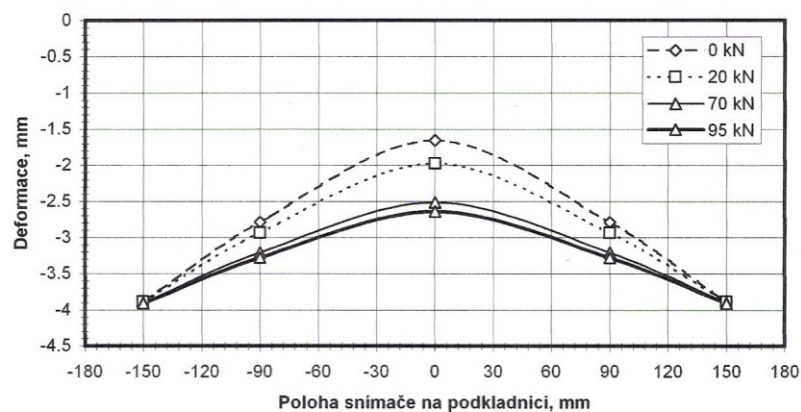
Obr. 4.3 – Naměřené deformace podkladnice – první zatěžovací stav

Deformace podkladnice od utažení a působení síly na kolejnici

Podložka pod podkladnici PP-GZ/DT-V1/P-č.3

Zatížení kolejnice	Poloha snímače na podkladnici [mm]				
	Pražc. šrouby	Žebro	Střed	Žebro	Pražc. šrouby
	-150	-90	0	90	150
0 kN	3.89	2.79	1.66	2.79	3.89
20 kN	3.89	2.94	1.97	2.94	3.89
70 kN	3.90	3.21	2.51	3.21	3.90
95 kN	3.91	3.28	2.64	3.28	3.91

	0	Pražc. šrouby	Žebro	Střed	Žebro	0	Pražc. šrouby
Zatížení kolejnice		-150	-90	0	90	150	
0 kN		-3.885	-2.787	-1.657	-2.787	-3.885	
20 kN		-3.886	-2.937	-1.974	-2.937	-3.886	
70 kN		-3.9	-3.207	-2.511	-3.207	-3.9	
95 kN		-3.91	-3.277	-2.639	-3.277	-3.91	



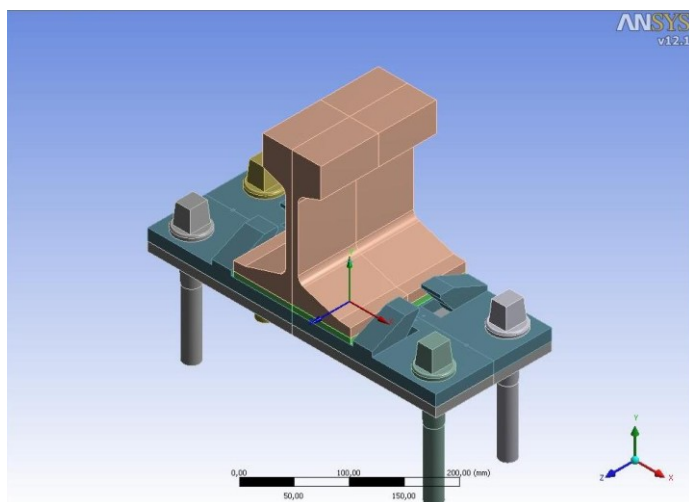
Obr. 4.4 – Naměřené deformace podkladnice – druhý zatěžovací stav

5. Metodika modelování

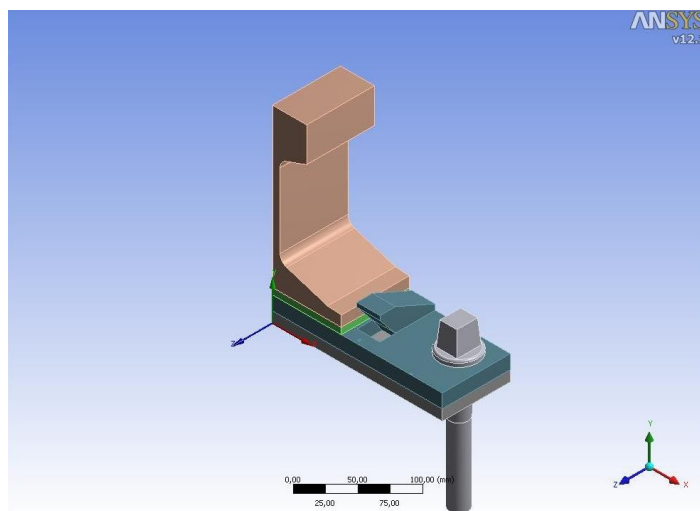
Pro dosažení dostatečně přesných výsledků je třeba vytvořit podrobný model celé soustavy kolejnice – železniční podkladnice a zkombinovat různé způsoby modelování jednotlivých součástí.

5.1 Symetrie

Soustava kolejnice – železniční podkladnice je v tomto případě symetrická podle dvou rovin. Podle roviny symetrie x-y a podle roviny symetrie y-z. Při modelování se využilo této symetrie a byl vytvořen jen $\frac{1}{4}$ model celé soustavy.



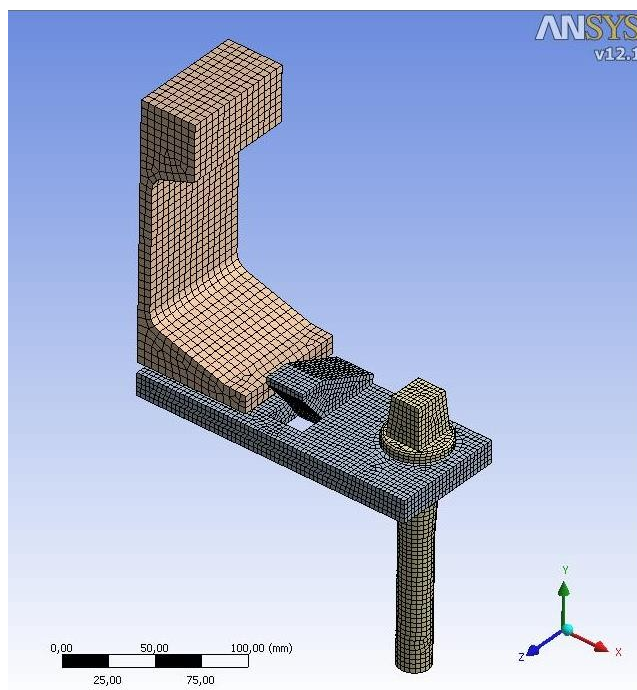
Obr. 5.1 – celý model - osy symetrie



Obr. 5.2 - $\frac{1}{4}$ modelu

5.2 Ocelové díly

Ocelové součásti, tedy železniční podkladnice, kolejnice a pražcové šrouby byly vytvořeny z hexahedrů tj. šestistěnné prvky charakteru kvádrů.



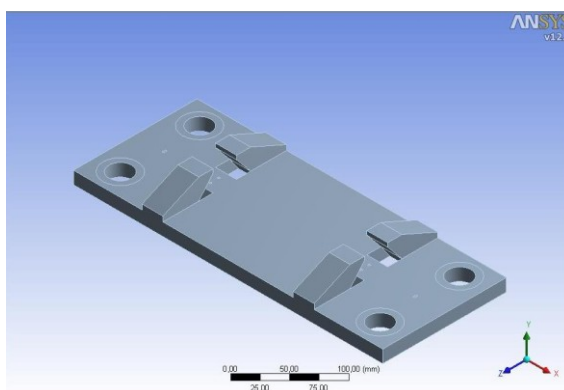
Obr. 5.3 – Ocelové díly

Tyto součásti jsme vymodelovali z oceli. Materiálové vlastnosti byly zvoleny pro všechny díly stejné, a to modul pružnosti $E = 210 \text{ GPa}$ a Poissonova konstanta $\mu = 0,3$.

5.2.1 Podkladnice

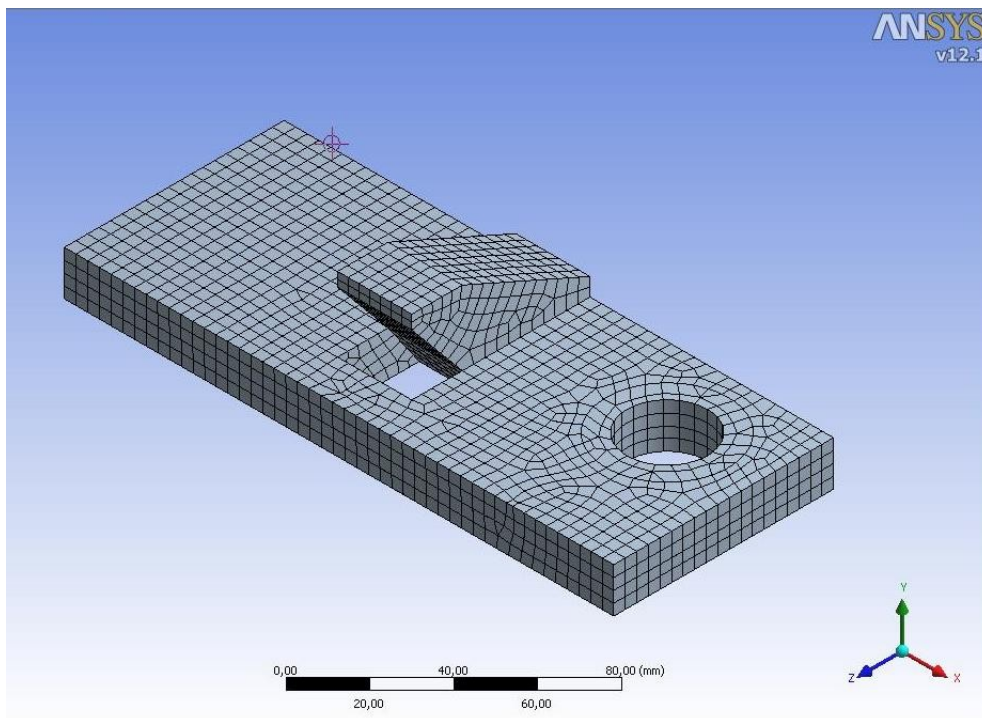


Obr. 5.4 – Podkladnice



Obr. 5.5 – Podkladnice model

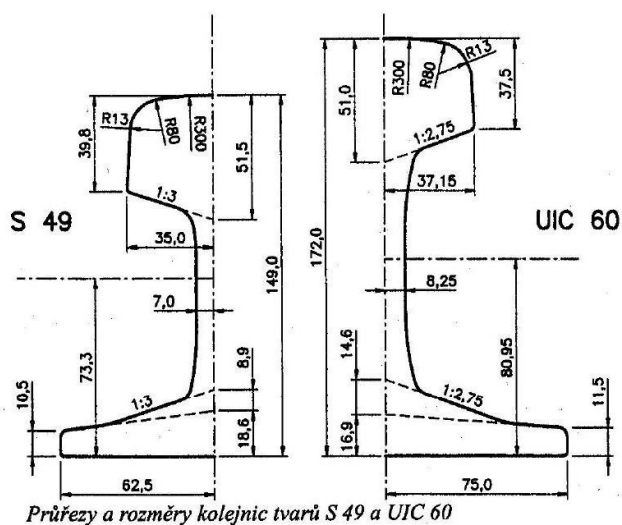
Rozměry podkladnice byly odečteny pomocí posuvného měřítka ze skutečné součásti. Jak bylo již výše zmíněno, podkladnice je symetrická podle dvou rovin, a tudíž je vymodelována jen $\frac{1}{4}$ modelu. Správná funkčnost výpočtu u čtvrtinového modelu se zajistí správným určením okrajových podmínek pro symetrický model.



Obr. 5.6 – Podkladnice - $\frac{1}{4}$ modelu

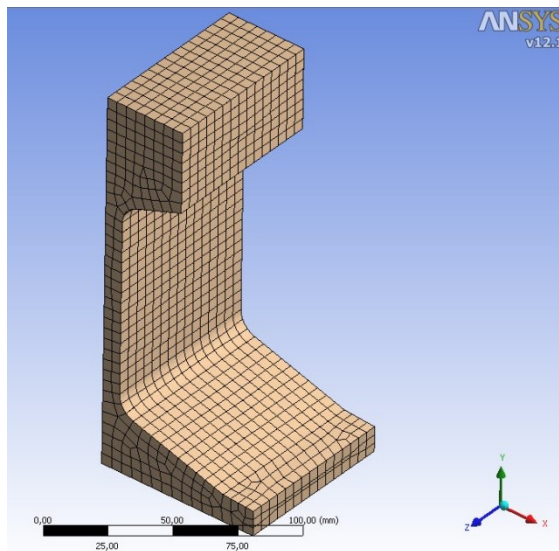
5.2.2 Kolejnice

Průřezy nejužívanějších kolejnic u ČSD a ČD



Obr. 5.7 – Rozměry kolejnice

Z nejpoužívanějších kolejnic u ČSD a ČD byl zjednodušeně vymodelován typ kolejnice UIC 60. Okrajové podmínky stejně jako u podkladnice zajišťují symetrii modelu.



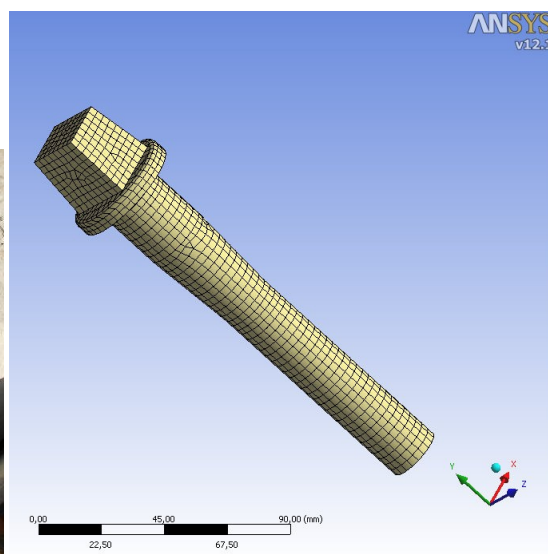
Obr. 5.8 – Kolejnice – 1/4 model

5.2.3 Pražcové šrouby

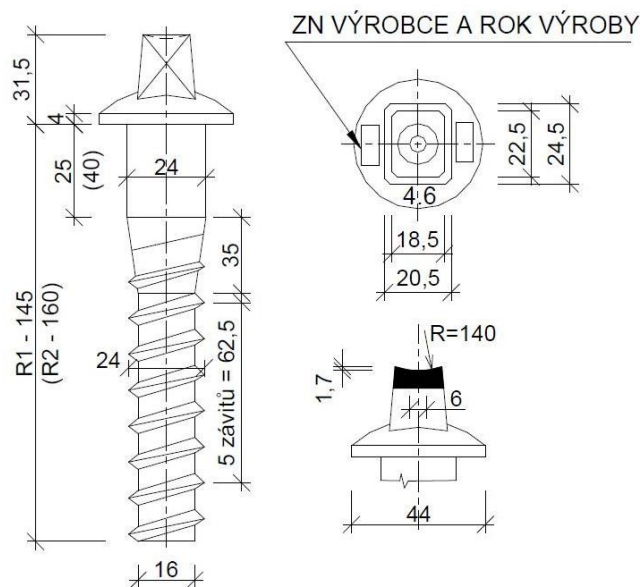
Pražcové šrouby slouží k uchycení podkladnice k pražci. Šrouby jsou utaheny utahovacím momentem 200 Nm a modelujeme je s daným předpětím šroubu. Předpětí na šroubu se zadává pomocí síly. Tato síla se bude doladovat do konečné přibližně skutečné hodnoty. Ta se získá, když vypočteme v místě vrtulí danou změřenou deformaci.



Obr. 5.9 – Utažená podkladnice vrtulemi



Obr. 5.10 – Pražcový šroub „vrtule“



Obr. 5.11 – Rozměry pražcového šroubu

Vymodelován byl pražcový šroub typu PLASTIRAIL. Pro správný výpočet se musí jako okrajová podmínka zamezit posuvu ve směru osy y na spodní plošce šroubu a zadat na plochu šroubu určité silové předpětí.

5.3 Pryžové podložky

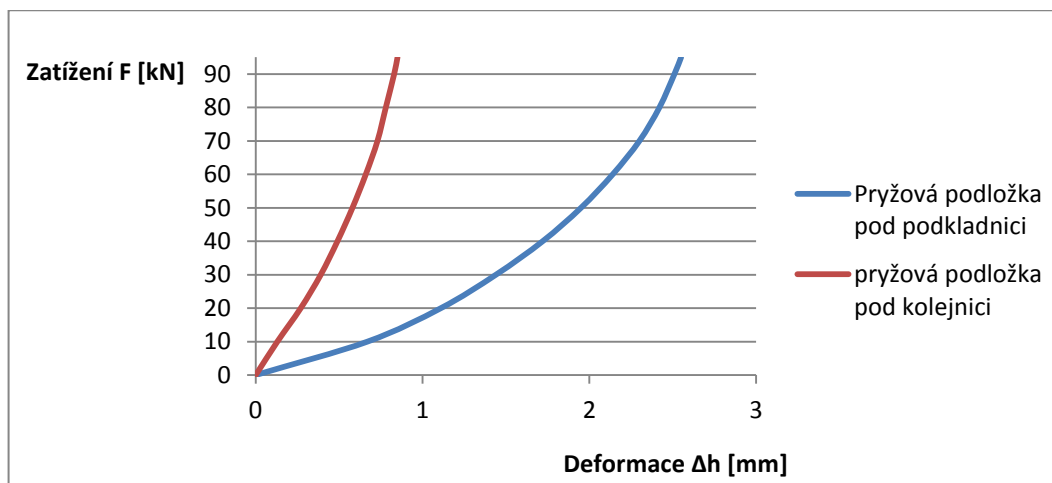
Pryžové podložky pod podkladnici ve variantě PP-GZ/DT-V1/P-č.1/SM400 a podložka pod patu kolejnice ve variantě RN-R65-01-č.4/ORIG/SM400 v soustavě představují nelineární prvek. Jak již bylo zmíněno, charakteristiky podložek byly změřeny na katedře Části a mechanismů strojů na fakultě strojní.



Obr. 5.12 – Podložka pod podkladnici



Obr. 5.13 – Podložka pod kolejnici



Obr. 5.14 – Charakteristika pryžových podložek

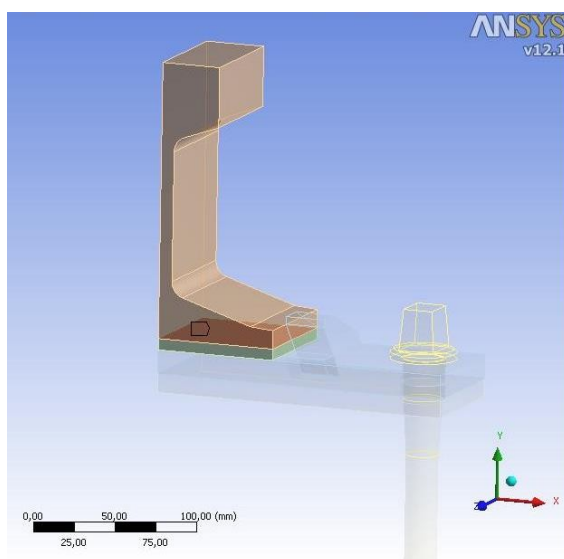
Pryžové podložky se chovají nelineárně. Pro zjednodušení jsou modelovány jako lineární prvky, proto modul pružnosti se vypočítá ze změřených hodnot pomocí lineární regrese. U obou podložek se pak dále při výpočtech bude měnit modul pružnosti E v závislosti na přibližování se k hodnotám naměřených deformací podkladnice pro určení napětěového stavu. Poissonova konstanta pryží byla vyhledána pro pryž a do modelu byla dosazena hodnota $\mu = 0,4999$.

Rozměry podložky pod podkladnici typu PP-GZ/DT-V1/P-č.1/SM400 jsou: strana $a_1 = 148$ mm, $b_1 = 370$ mm a výška pryžové podložky $h_{01} = 11,5$ mm. Rozměry podložky pod kolejnici typu RN-R65-01-č.4/ORIG/SM400 jsou: strana $a_2 = 148$ mm, $b_2 = 150$ mm a výška pryžové podložky $h_{02} = 7$ mm.

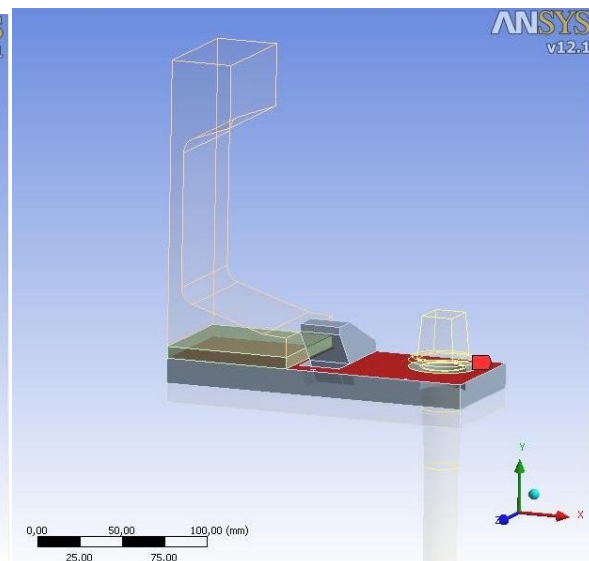
Okrajové podmínky pro pryže jsou stejné jako u podkladnice a kolejnice, je tedy zajištěna symetrie modelu. Podložka pod podkladnici má navíc ze spodní strany uchycen posuv ve směru osy y , ten demonstruje stav položené pryžové podložky na pražci.

5.4 Kontakty

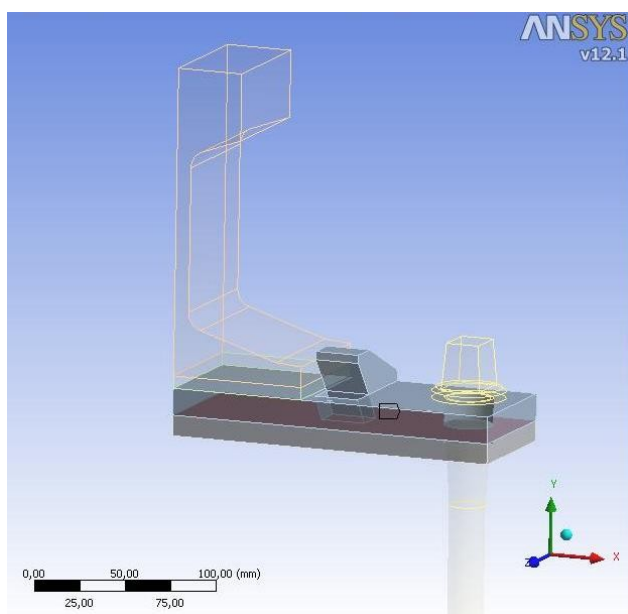
Modelovaná soustava obsahuje více součástí, mezi kterými dochází ke kontaktu. Pro správné výpočty se musí zvolit nejvhodnější typ, který bude charakterizovat reálnou soustavu. Pro výpočty soustavy byly zvoleny dvě varianty kontaktů. První varianta, kdy se celá sestava slepí dohromady a další varianta, kdy bude mezi kolejnicí, podkladnicí a pryžovými podložkami docházet ke tření.



Obr. 5.15 – Kontakt kolejnice – pryž



Obr. 5.16 – Kontakt pryž - podkladnice



Obr. 5.17 – Kontakt podkladnice - pryž

6. Výpočty

6.1 Výpočet modulu pružnosti pryží

Jak již bylo výše zmíněno, modul pružnosti v tahu E jednotlivých pryží spočítáme z naměřených statických parametrů pryžových podložek na fakultě strojní. Z vytvořených grafů v závislosti na zatížení a deformace pryže se vygenerovala rovnice pro lineární regresi. Pro přesnější přiblížení skutečné hodnotě modulu pružnosti pryže E byla provedena lineární regrese jen do zatížení 70 kN.

6.1.1 Pryžová podložka pod podkladnici

V první řadě se pro dané změřené hodnoty vypočítal skutečný modul pružnosti pryže E_1 . Modul pružnosti pryže E se vypočítá ze zadaných hodnot. Vypočítá se z obsahu podložky pod podkladnici.

$$S_1 = a_1 \cdot b_1 = 48 \cdot 370 = \underline{\underline{17760 \text{ mm}^2}} \quad (6.1)$$

kde: $a_1, b_1 \dots$ rozměry pryže pod podkladnici

Dále vypočteme tlak pro jednotlivé zatížení. Příklad výpočtu modulu pružnosti E je uveden pro podložku zatíženou silou $F = 10 \text{ kN}$.

$$P_{10} = \frac{F_{10}}{S_1} = \frac{10000}{17760} = \underline{\underline{0,563 \text{ MPa}}} \quad (6.2)$$

Modul pružnosti je závislý na tlaku P a poměrné deformaci ε , která se vypočítá z deformace pryže při zatěžování různými silami a z výšky pryžové podložky pod podkladnici $h_{o1} = 11,5 \text{ mm}$.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_0}{h_{o1}} = \frac{0,67}{11,5} = \underline{\underline{0,0583}} \quad (6.3)$$

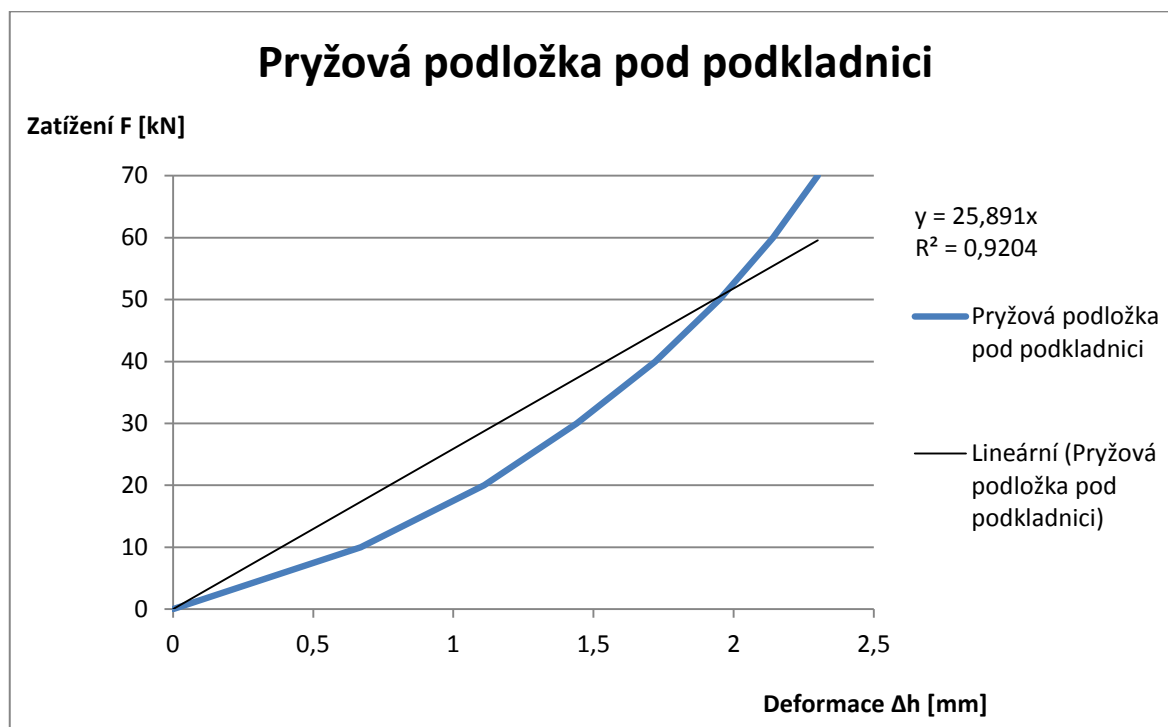
$$E_{10} = \frac{P_{10}}{\varepsilon_{10}} = \frac{0,1826}{0,0583} = \underline{\underline{3,13 \text{ MPa}}} \quad (6.4)$$

Ostatní hodnoty pro jednotlivá zatížení, jsou uvedeny v tabulce 6.1. Tyto hodnoty se dopočítali v programu Microsoft Excel.

Tabulka 6.1 – Výpočet skutečného modulu pružnosti pro pryž pod podkladnici

Zatížení F	Deformace	tlak P	ε	Skutečný modul pružnosti E_1
[kN]	[mm]	[MPa]	[-]	[MPa]
10	0,67	0,1826	0,0583	3,13
20	1,11	0,3652	0,0965	3,78
30	1,44	0,5478	0,1252	4,38
40	1,72	0,7305	0,1496	4,88
50	1,95	0,9131	0,1696	5,38
60	2,14	1,0957	0,1861	5,89
70	2,3	1,2783	0,2000	6,39
80	2,42	1,4609	0,2104	6,94
90	2,51	1,6435	0,2183	7,53
95	2,55	1,7348	0,2217	7,82

Výpočet rovnice lineární regrese:



Obr. 6.1 – Lineární regrese pro pryžovou podložku pod podkladnici

Rovnice regrese pro podložku pod podkladnici:

$$y = 25,89 \cdot x \quad (6.5)$$

kde: y ... zatížení F
x ... deformace Δh

Pomocí rovnice (6.5) přepočteme sílu F pro dané deformace a dosadíme do vztahů (6.2) a (6.4), ze kterých se získá jeden modul pružnosti pro lineární závislost. Poměrná deformace ε bude mít stejné hodnoty jako u výpočtu skutečného modulu pružnosti E_1 .

$$F_{10} = 25,89 \cdot x = 25,89 \cdot 0,67 = \underline{\underline{7,346 \text{ kN}}} \quad (6.6)$$

$$P_{10} = \frac{F_{10}}{S_1} = \frac{7346}{54760} = \underline{\underline{0,3168 \text{ MPa}}} \quad (6.7)$$

$$E_1 = \frac{P_{10}}{\varepsilon} = \frac{0,3168}{0,0583} = \underline{\underline{5,44 \text{ MPa}}} \quad (6.8)$$

Výpočty dalších hodnot se provedly opět v programu Microsoft Excel.

Tabulka 6.2 – Vypočtené hodnoty modulu E_1

Síla F po Regresi	Tlak P po Regresi	Modul pružnosti E_1
[kN]	[MPa]	[MPa]
17,346	0,3168	5,44
28,738	0,5248	5,44
37,282	0,6808	5,44
44,531	0,8132	5,44
50,486	0,9219	5,44
55,405	1,0118	5,44
59,547	1,0874	5,44
62,654	1,1442	5,44
64,984	1,1867	5,44
66,020	1,2056	5,44

Výsledný modul pružnosti pro pryžovou podložku pod podkladnicí $E_1 = 5,44 \text{ MPa}$.

6.1.2 Pryžová podložka pod kolejnici

Postup výpočtu modulu pružnosti pro pryžovou podložku pod kolejnici je stejný jako u podložky pod podkladnici. Zprv se vypočítá skutečný modul pružnosti pryže E_2 pro dané změřené hodnoty.

Výpočet obsahu podložky pod kolejnici.

$$S_2 = a_2 \cdot b_2 = 48 \cdot 150 = \underline{\underline{7200 \text{ mm}^2}} \quad (6.9)$$

kde: a_2, b_2 ... rozměry pryže pod kolejnici

Dále vypočteme tlak pro jednotlivé zatížení. Příklad výpočtu modulu pružnosti E je opět uveden pro podložku zatíženou silou $F = 10 \text{ kN}$.

$$P_{10} = \frac{F_{10}}{S_2} = \frac{10000}{7200} = \underline{\underline{1,4505 \text{ MPa}}} \quad (6.10)$$

Do vztahu pro výpočet poměrné deformace za výšku pryžové podložky pod kolejnici h_{o2} dosadíme 7 mm .

$$\varepsilon_{10} = \frac{\Delta h_{10}}{h_{o2}} = \frac{0,13}{7} = \underline{\underline{0,0186}} \quad (6.11)$$

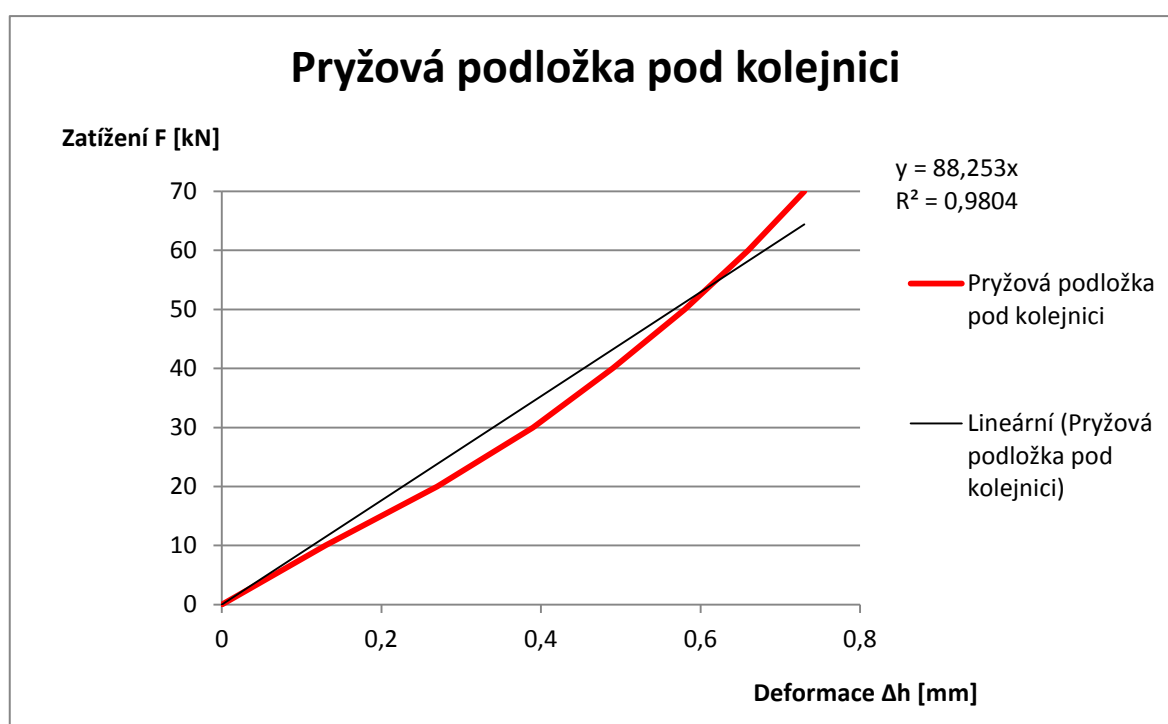
$$E_{10} = \frac{P_{10}}{\varepsilon_{10}} = \frac{1,4505}{0,0186} = \underline{\underline{78,04 \text{ MPa}}} \quad (6.12)$$

Ostatní hodnoty vypočítané v programu Microsoft Excel, jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3 – Výpočet skutečného modulu pružnosti pro pryž pod kolejnici

Zatížení F	Deformace	tlak P	ϵ	Skutečný modul pružnosti E_2
[kN]	[mm]	[MPa]	[-]	[MPa]
10	0,13	0,4505	0,0186	24,26
20	0,27	0,9009	0,0386	23,36
30	0,39	1,3514	0,0557	24,26
40	0,49	1,8018	0,0700	25,74
50	0,58	2,2523	0,0829	27,18
60	0,66	2,7027	0,0943	28,67
70	0,73	3,1532	0,1043	30,24
80	0,78	3,6036	0,1114	32,34
90	0,83	4,0541	0,1186	34,19
95	0,85	4,2793	0,1214	35,24

Výpočet rovnice lineární regrese:



Obr. 6.2 – Lineární regrese pro pryžovou podložku pod kolejnici

Rovnice regrese pro podložku pod podkladnici:

$$y = 88,25 \cdot x \quad (6.13)$$

kde: y ... zatížení F
x ... deformace Δh

Pomocí rovnice (6.13) přepočteme sílu F pro dané deformace a dosadíme do vztahů (6.10) a (6.12), ze kterých se získá jeden modul pružnosti pro lineární závislost. Poměrná deformace ε bude mít stejné hodnoty jako u výpočtu skutečného modulu pružnosti E_2 .

$$F_{10} = 18,25 \cdot x = 18,25 \cdot 0,13 = \underline{\underline{1,473 \text{ kN}}} \quad (6.14)$$

$$P_{10} = \frac{F_{10}}{S_2} = \frac{1,473}{22200} = \underline{\underline{0,5168 \text{ MPa}}} \quad (6.15)$$

$$E_2 = \frac{P_{10}}{\varepsilon} = \frac{0,5168}{0,0186} = \underline{\underline{27,83 \text{ MPa}}} \quad (6.16)$$

Výpočty dalších hodnot pro modul pružnosti podložky pod kolejnici E_2 se provedli opět v programu Microsoft Excel.

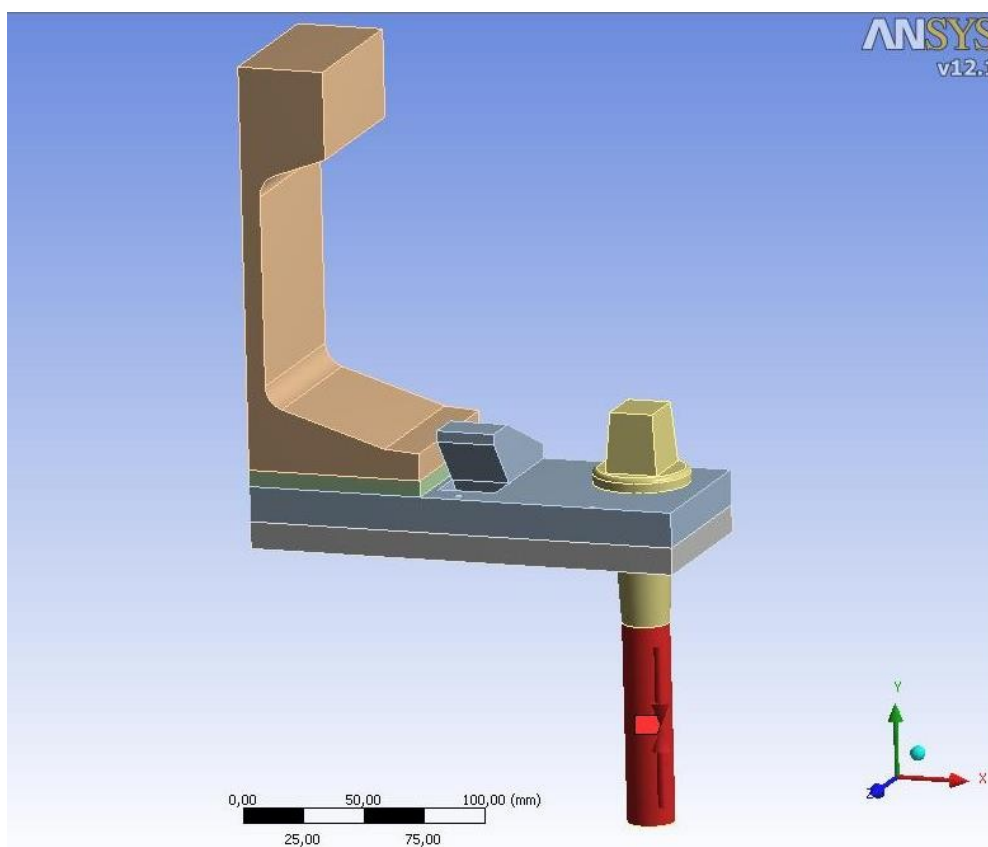
Tabulka 6.4 – Vypočtené hodnoty modulu E_2

Síla F po Regresi	Tlak P po Regresi	Modul pružnosti E_2
[kN]	[MPa]	[MPa]
11,473	0,5168	27,83
23,828	1,0733	27,83
34,418	1,5503	27,83
43,243	1,9479	27,83
51,185	2,3056	27,83
58,245	2,6236	27,83
64,423	2,9019	27,83
68,835	3,1007	27,83
73,248	3,2994	27,83
75,013	3,3789	27,83

Výsledný modul pružnosti pro pryžovou podložku pod kolejnici $E_2 = 27,83 \text{ MPa}$.

6.2 Výpočet předpětí v pražcovém šroubu

Konečná hodnota předpětí F_p ve šroubu pro daný dotahovací moment se získá opakovaným výpočtem pomocí programu Ansys Workbench při dosazování různých hodnot předpětí do modelu v prvním zatěžovacím stavu. Předpětí se do modelu zadává osovou silou.



Obr. 6.3 – Plocha šroubu, na které je zadané silové předpětí

Výpočty jsou provedené pro dvě varianty kontaktů mezi jednotlivými součástmi celé soustavy, a to pro variantu A (slepené všechny součásti k sobě - BONDED) a pro variantu B (FRICITONAL 0,3), kdy mezi podkladnicí, kolejnicí a pryžemi působí tření o velikosti koeficientu tření $f_t = 0,3$. Výpočty předpětí jsou uvedené v tab. 6.6 a v tab. 6.7.

Tabulka 6.5 – Naměřené deformace podkladnice na fakultě strojní

Naměřené deformace

	Střed [mm]	Žebro [mm]	Vrtule [mm]
1. zatěžovací stav	1,66	2,79	3,89
2. zatěžovací stav	2,64	3,28	3,91

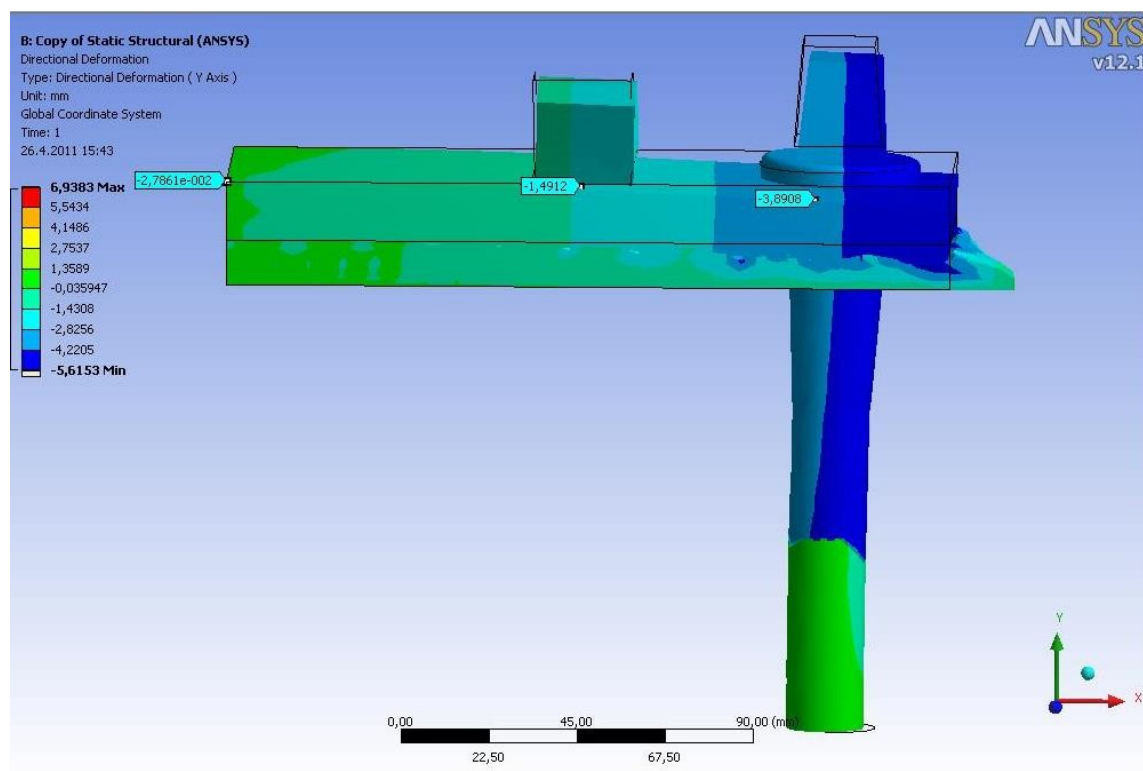
6.2.1 Varianta A – BONDED

Tabulka 6.6 – Vypočítané hodnoty předpětí pražcového šroubu

Vypočítané hodnoty deformací - KONTAKT - BONDED

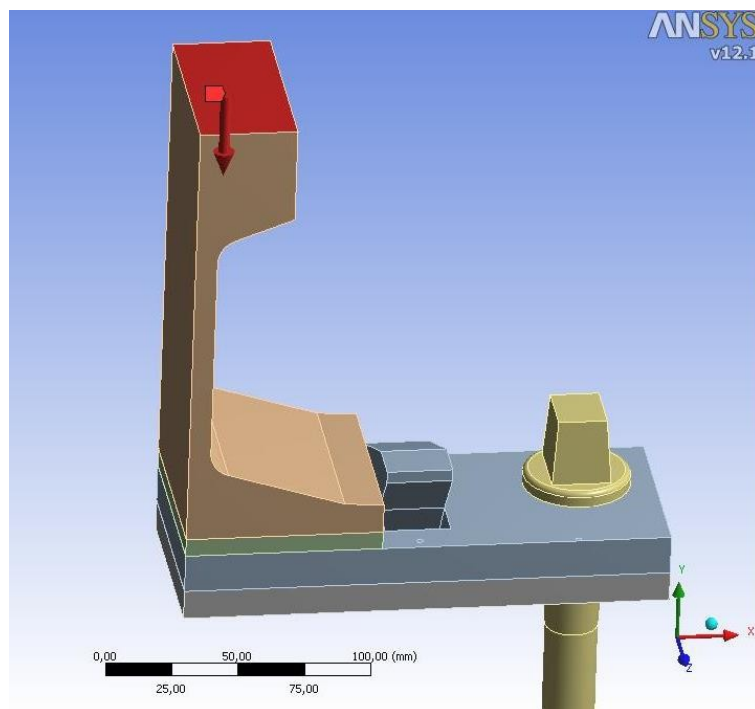
	E_1	E_2	před. F_p	stav	střed	žebro	vrtule
	[MPa]	[MPa]	[N]		[mm]	[mm]	[mm]
1	5,44	27,83	30000	1. zatěžovací stav	0,02	0,72	1,89
				2. zatěžovací stav	0,89	1,22	1,92
2	5,44	27,83	60000	1. zatěžovací stav	0,03	1,44	3,76
				2. zatěžovací stav	0,90	1,93	3,79
3	5,44	27,83	63000	1. zatěžovací stav	0,03	1,51	3,95
				2. zatěžovací stav	0,90	2,01	3,98
4	5,44	27,83	62000	1. zatěžovací stav	0,03	1,49	3,89
				2. zatěžovací stav	0,90	1,98	3,92

Výsledné silové předpětí šroubu $F_{p1} = 62\,000\text{ N}$. Toto předpětí působí ve šroubu při utažení utahovacím momentem $M_u = 200\text{ Nm}$.

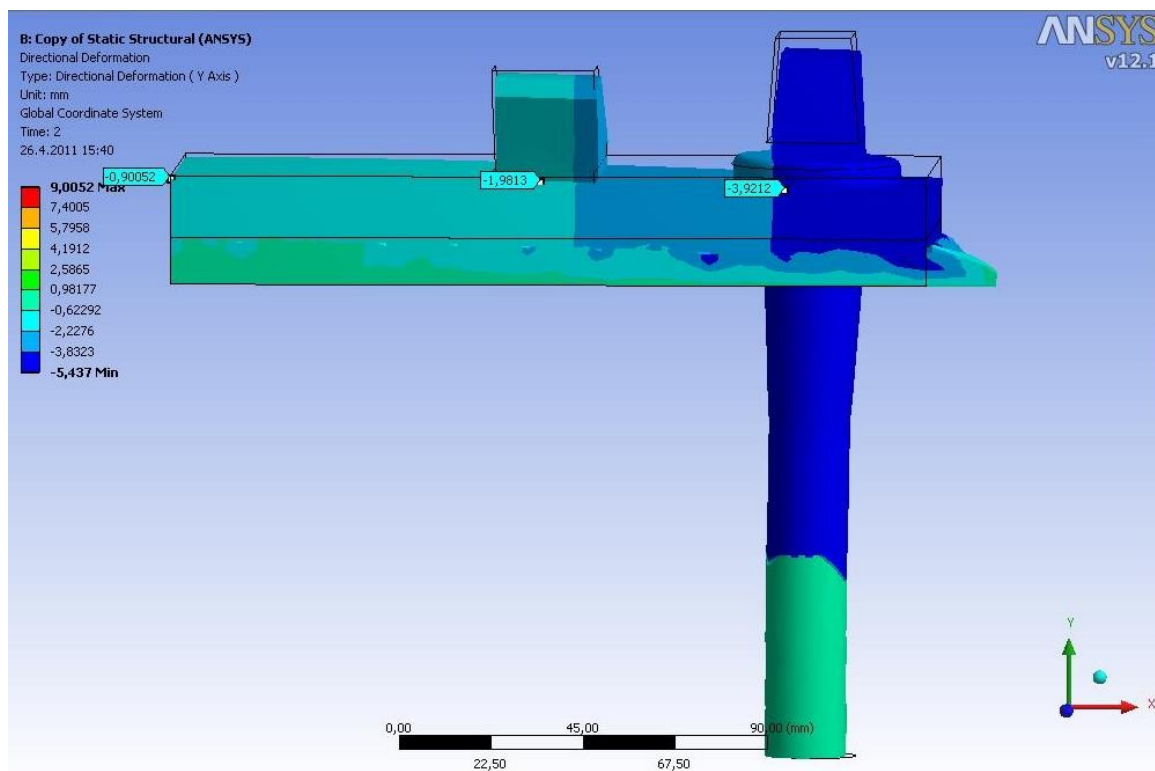


Obr. 6.4 - Deformace podkladnice - 1.zatěž. stav s předpětím 62 kN a tuhostí pryží E_1 a E_2 , kontakt BONDED

Při zatížení kolejnice silou 95 000 N se podkladnice vyrovná, a tím se předpětí ve šroubu zmenší. Na vytvořený $\frac{1}{4}$ model se zadává jen $\frac{1}{4}$ zatěžovací síla.



Obr. 6.5 – Zatížení kolejnice – $\frac{1}{4}$ model



Obr. 6.6 – Deformace podkladnice – 2. zatěž. stav se zatížením kolejnice silou 95 kN, předpětím 62 kN a tuhosti pryží E_1 a E_2

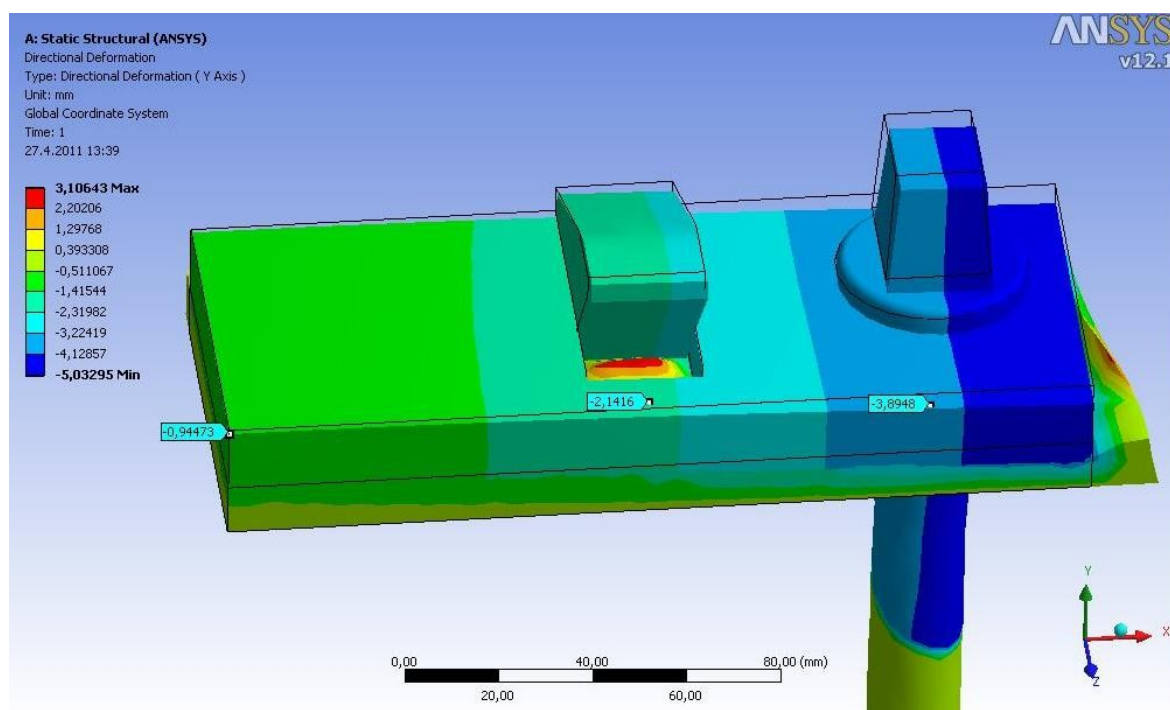
6.2.2 Varianta B – FRICTIONAL 0,3

Tabulka 6.7 - Vypočítané hodnoty předpětí pražcového šroubu

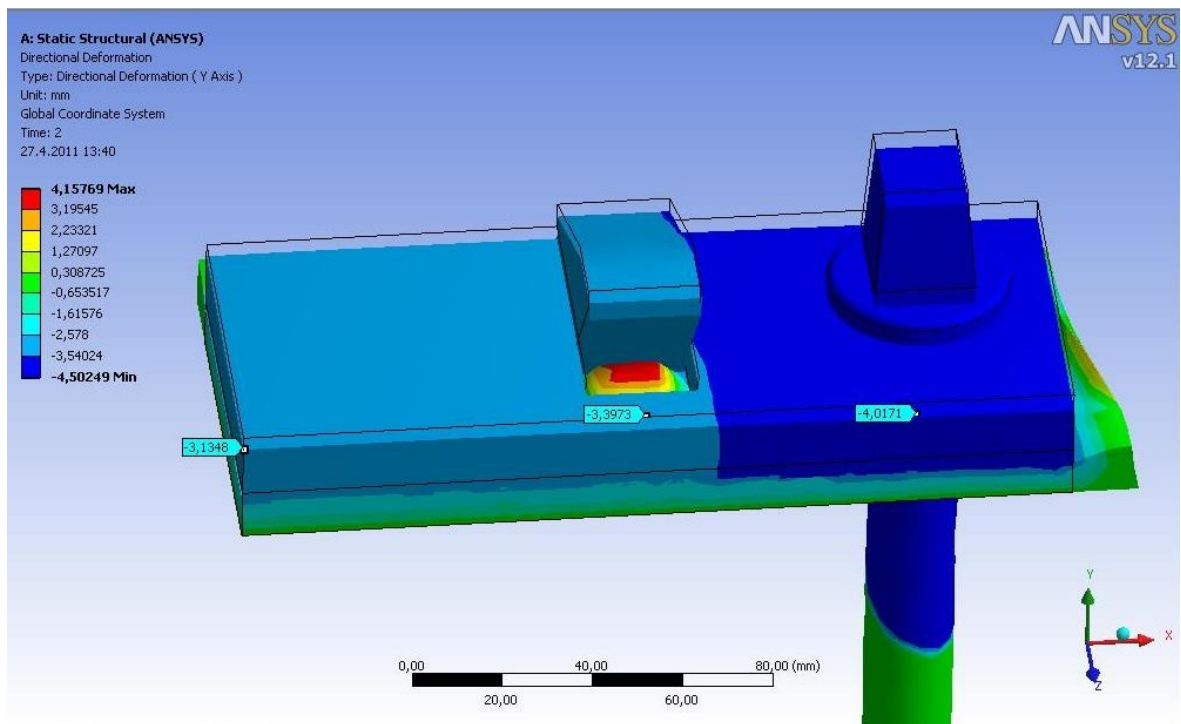
Vypočítané hodnoty deformací - KONTAKT - FRICTIONAL $f_t = 0,3$

	E_1	E_2	před.	stav	střed	žebro	vrtule
	[MPa]	[MPa]	[N]		[mm]	[mm]	[mm]
1	5,44	27,83	40000	1. zatěžovací stav	1,14	2,51	4,51
				2. zatěžovací stav	3,35	3,77	4,62
2	5,44	27,83	35000	1. zatěžovací stav	0,93	2,11	3,85
				2. zatěžovací stav	3,12	3,37	3,97
3	5,44	27,83	35600	1. zatěžovací stav	0,96	2,16	3,93
				2. zatěžovací stav	3,15	3,42	4,05
4	5,44	27,83	35400	1. zatěžovací stav	0,95	2,15	3,90
				2. zatěžovací stav	3,14	3,40	4,02
5	5,44	27,83	35390	1. zatěžovací stav	0,94	2,14	3,89
				2. zatěžovací stav	3,13	3,40	4,02

Výsledné silové předpětí šroubu $F_{p2} = 35\,390\text{ N}$. Toto předpětí působí ve šroubu při utažení utahovacím momentem $M_u = 200\text{ Nm}$.



Obr. 6.7 - Deformace podkladnice - 1.zatěž. stav s předpětím 35,39 kN a tuhostí pryží E_1 a E_2 , kontakt FRICTIONAL 0,3



Obr. 6.8 – Deformace podkladnice – 2. zatěž. stav se zatížením kolejnice silou 95 kN, předpětím 35,39 kN a tuhosti pryží E_1 a E_2

Jako zajímavost je uveden inženýrský výpočet silového předpětí ve šroubu pro osovou sílu, která se dá také vypočítat ze vztahu platného pro výpočet utahovacího momentu.

$$M_u = \frac{3}{2} \cdot F_o \cdot \operatorname{tg}(\psi - \varphi) \cdot \frac{d_2}{2} \quad (6.17)$$

Do vztahu (6.17) pro výpočet osové síly ve šroubu se dopočítá podle vztahu (6.18) třecí úhel stoupání závitu ψ , kde stoupání závitu $Ph = 12,5$ mm a střední průměr závitu $d_2 = 20$ mm. Dále redukovaný třecí úhel φ , kde koeficient tření mezi dřevem a ocelí $f_z = 0,35$ a úhel stoupání závitu $\alpha = 60^\circ$.

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{Ph}{\pi \cdot d_2} = \operatorname{arctg} \frac{12,5}{\pi \cdot 20} = \underline{\underline{11,25^\circ}} \quad (6.18)$$

$$\varphi = \arctg \frac{fz}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \arctg \frac{0,35}{\cos \frac{60}{2}} = \underline{\underline{22,01^\circ}} \quad (6.19)$$

Osová síla ve šroubu:

$$F_o = \frac{2}{3} \cdot \frac{M_u}{tg(\psi - \varphi) \cdot \frac{d_2}{2}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{200000}{tg(11,25 + 22,01) \cdot \frac{20}{2}} = \underline{\underline{20329 N}} \quad (6.20)$$

Srovnání výsledků předpětí ve šroubu pro utahovací moment 200 Nm. U kontaktu BONDED vyšlo předpětí ve šroubu $F_{p1} = 62\,000\text{ N}$, pro kontakt FRICTIONAL 0,3 je předpětí $F_{p2} = 35\,390\text{ N}$ a osová síla ve šroubu podle inženýrského výpočtu $F_o = 20\,329\text{ N}$. Osová síla F_o je 3,05x menší než předpětí F_{p1} a 1,74x menší než F_{p2} . Zhodnocení výsledků předpětí F_{p1} a F_{p2} je popsáno v kapitole 7.

6.3 Výpočet napětí na podkladnici

Pro určení napětí, které vznikne při deformaci podkladnice v prvním a v druhém zatěžovacím stavu, je třeba dosáhnout naměřených hodnot deformace v určitých místech podkladnice. Do výpočtu se proto dosazovaly různé hodnoty předpětí, modulů pružností E_1 a E_2 a také zatížení kolejnice. Výpočty jsou zaznamenány v tabulce 6.8 a 6.9. Další výpočty různých variant kontaktů jsou uvedeny v příloze.

6.3.1 Varianta A – BONDED

Tabulka 6.8 – Výpočet deformace podkladnice na třech určených místech

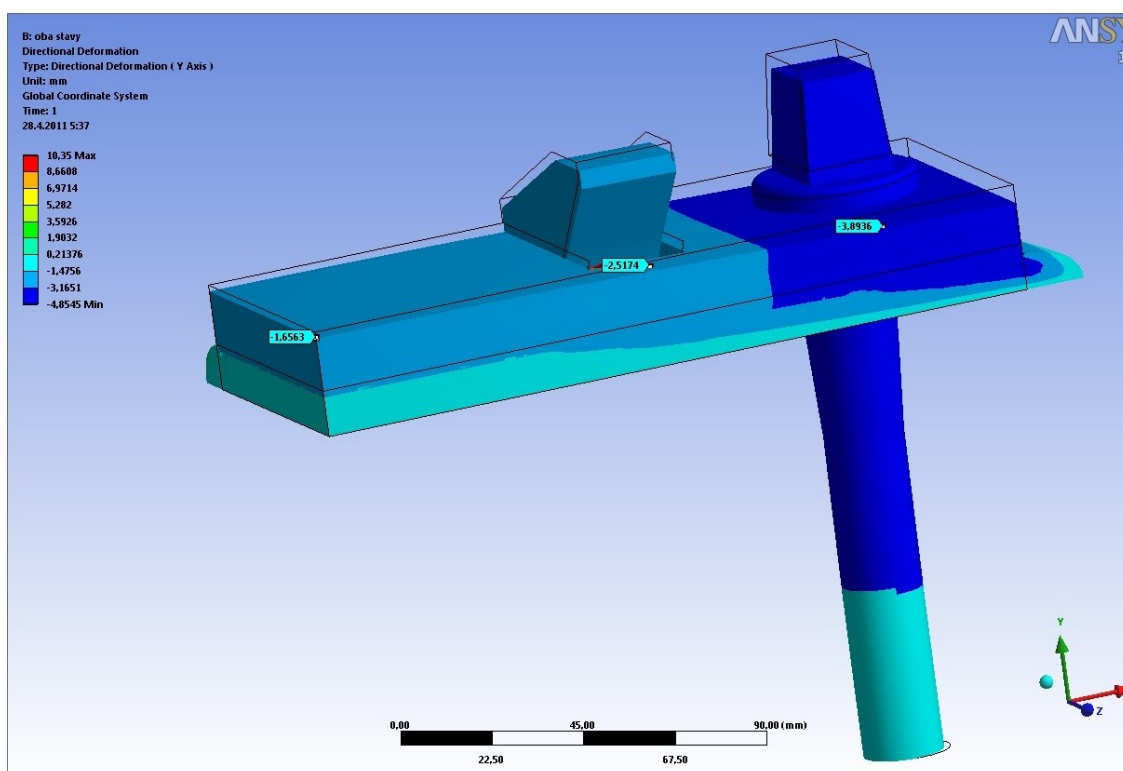
Naměřené deformace podkladnice

	Střed [mm]	Žebro [mm]	Vrtule [mm]
1. zatěžovací stav	1,66	2,79	3,89
2. zatěžovací stav	2,64	3,28	3,91

Vypočítané hodnoty deformací - KONTAKT - BONDED

	E_1	E_2	před. F_p	stav	střed	žebro	vrtule	Zatížení kolejnice
	[MPa]	[MPa]	[N]		[mm]	[mm]	[mm]	[N]
1	5,44	27,83	62000	1. zatěžovací stav	0,03	1,49	3,89	
				2. zatěžovací stav	0,90	1,98	3,92	23750
2	1,04	26	19530	1. zatěžovací stav	2,01	2,77	3,97	
				2. zatěžovací stav	3,47	3,69	4,07	10000
3	1,06	26	19500	1. zatěžovací stav	1,93	2,68	3,87	
				2. zatěžovací stav	2,91	3,29	3,94	8000
4	1,2	26	20500	1. zatěžovací stav	1,75	2,53	3,76	
				2. zatěžovací stav	2,68	3,10	3,82	8000
5	1,35	26	22850	1. zatěžovací stav	1,66	2,51	3,85	
				2. zatěžovací stav	2,54	3,05	3,91	8000
6	1,37	26	23450	1. zatěžovací stav	1,62	2,48	3,87	
				2. zatěžovací stav	2,58	3,09	3,93	8500
7	1,36	26	23300	1. zatěžovací stav	1,62	2,49	3,87	
				2. zatěžovací stav	2,59	3,09	3,93	8500
8	1,35	26	23200	1. zatěžovací stav	1,64	2,50	3,87	
				2. zatěžovací stav	2,61	3,11	3,94	8500
9	1,34	26	23200	1. zatěžovací stav	1,66	2,52	3,89	
				2. zatěžovací stav	2,63	3,13	3,96	8500

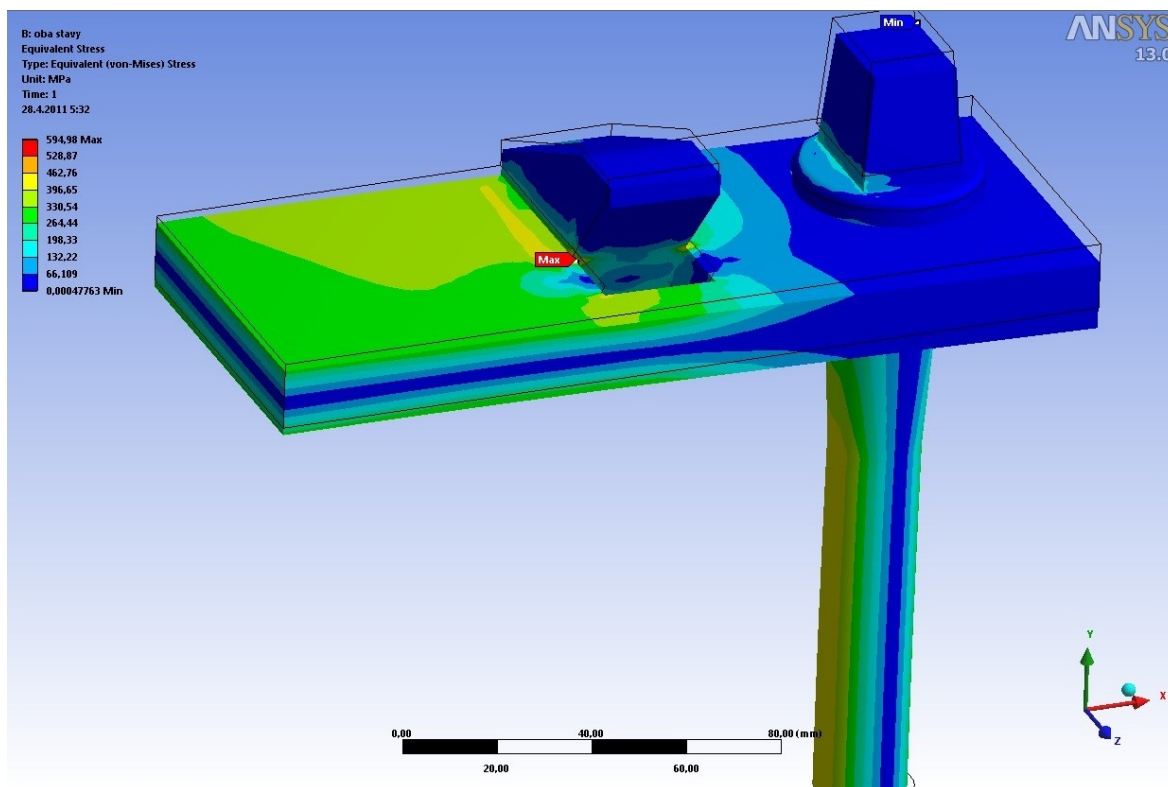
Výpočet napětí u prvního zatěžovacího stavu



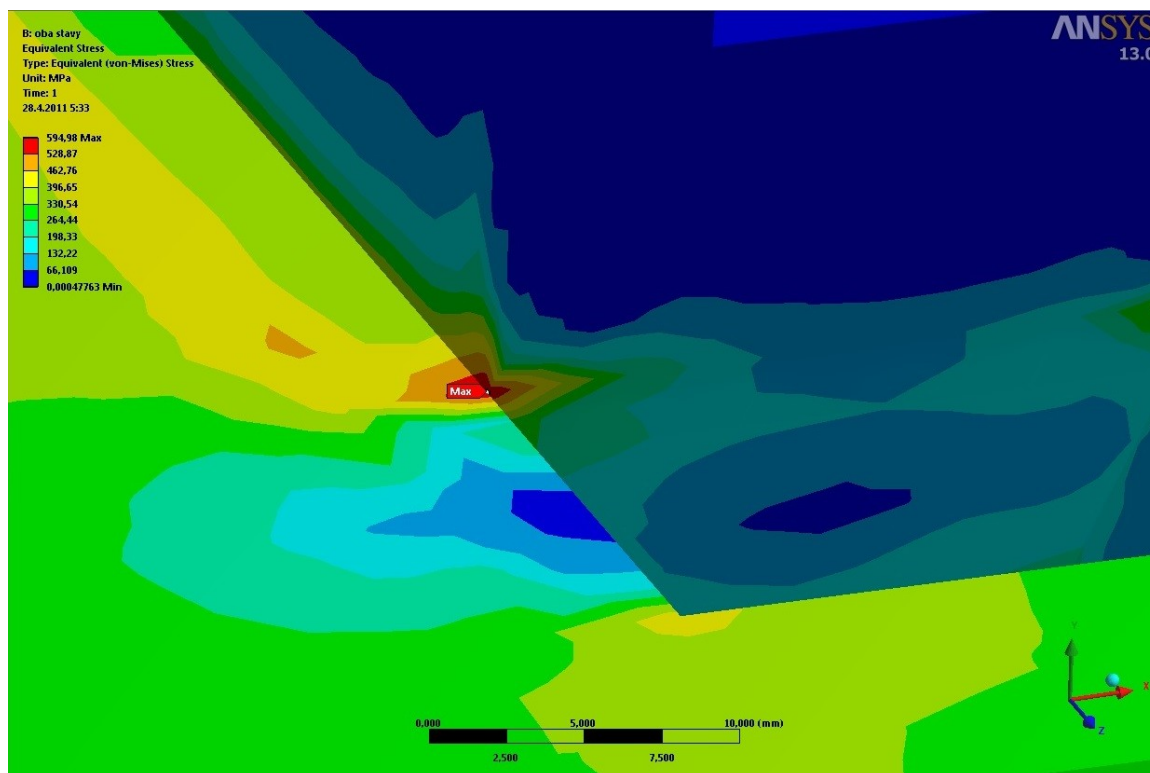
Obr. 6.9 – Konečný výpočet deformace podkladnice

Vypočtené deformace podkladnice s naměřenými deformacemi se shodují ve dvou místech na podkladnici. V místě žebra na podkladnici je deformace o 0,27 mm menší. Těchto deformací se dosáhlo dosazením za modul pružnosti $E_1 = 1,34$ MPa (pryž pod podkladnici) a za předpětí síla $F_p = 23\,200$ N.

Grafické znázornění výsledků napětí podkladnice. Pro lepší viditelnost je na obr. 6.10 a 6.11 zobrazena jen podkladnice a pražcový šroub.



Obr. 6.10 - Napětí podkladnice v prvním zatěžovacím stavu

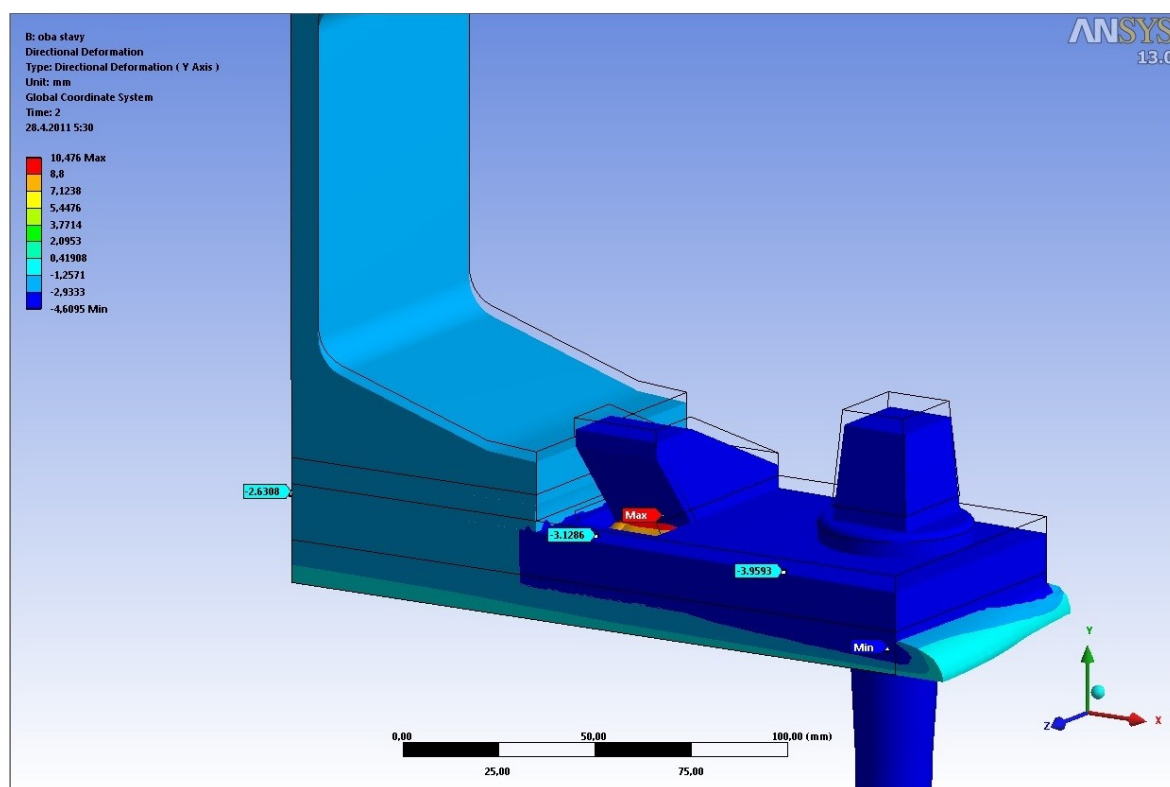


Obr. 6.11 – Detail napětí

Maximální hodnota napětí je zobrazeno na obr. 6.10 a 6.11.

$$\sigma = \underline{\underline{594,98 \text{ MPa}}}$$

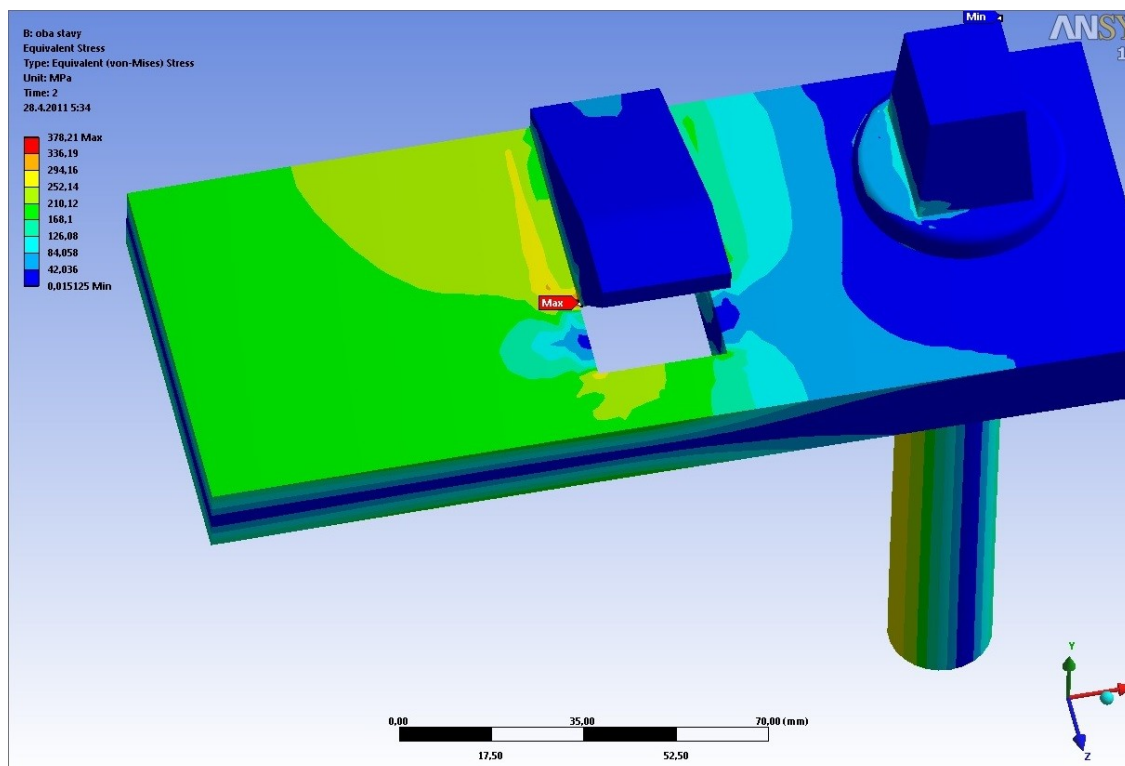
Výpočet napětí u druhého zatěžovacího stavu



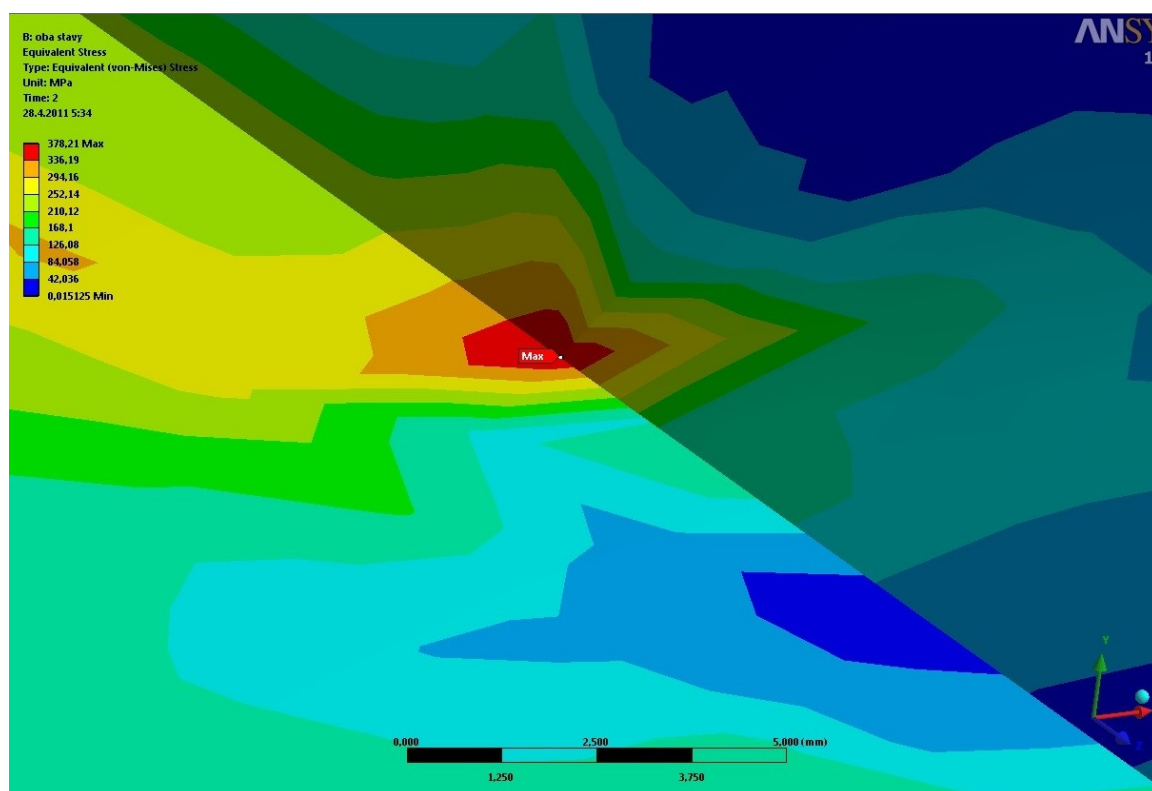
Obr. 6.12 - Deformace podkladnice v druhém zatěžovacím stavu

Pro zjištění napětí u druhého zatěžovacího stavu se měnily hodnoty modulu pružnosti pryže pod kolejnicí E_2 . Z důvodu malé tuhosti pryže pod podkladnicí se snižovalo i zatížení na kolejnici. Toto snižování zatížení se také provádělo proto, aby se co nejblíže shodovaly výpočty deformace v určitých bodech podkladnice se změřenými deformacemi.

Grafické znázornění výsledků napětí podkladnice. Na obr. 6.13 a 6.14 je zobrazena jen podkladnice a pražcový šroub. Zbytek součástí je skryto pro lepší zobrazení napětí.



Obr. 6.13 – Napěťový stav podkladnice v druhém zatěžovacím stavu



Obr. 6.14 – Detail napětí

Maximální hodnota napětí je zobrazeno na obr. 6.13 a 6.14.

$$\sigma = \underline{\underline{378,21 \text{ MPa}}}$$

6.3.2 Varianta B – FRICTIONAL 0,3

Tabulka 6.9 - Výpočet deformace podkladnice na třech určených místech

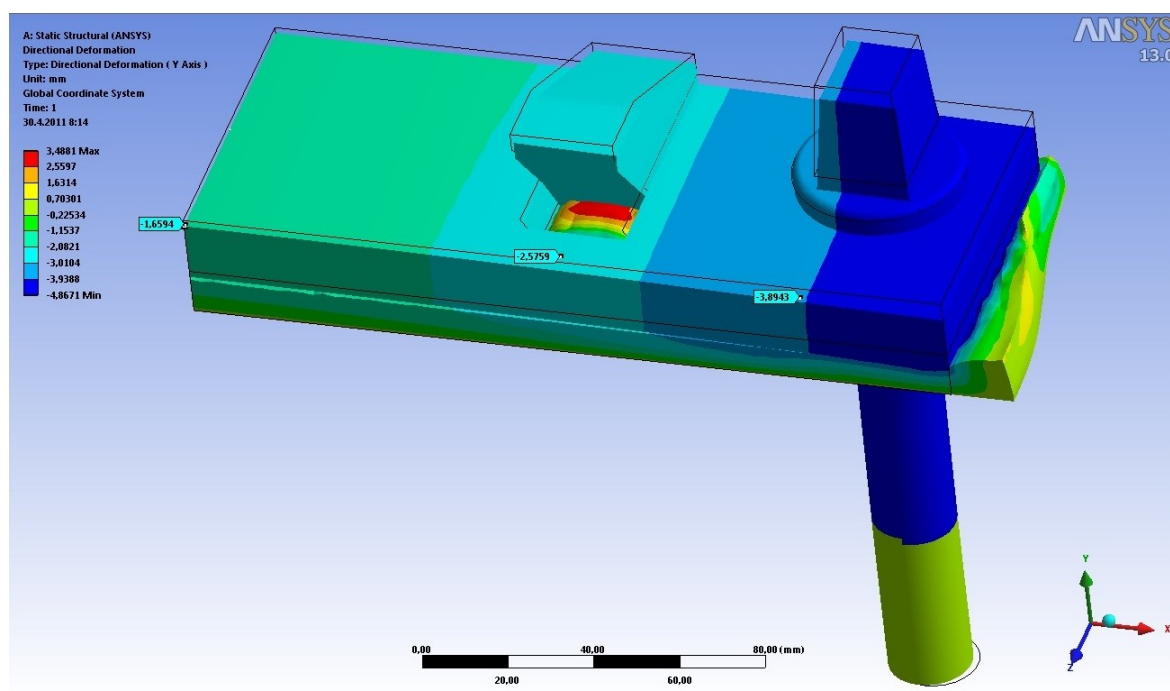
Naměřené deformace podkladnice

	Střed [mm]	Žebro [mm]	Vrtule [mm]
1. zatěžovací stav	1,66	2,79	3,89
2. zatěžovací stav	2,64	3,28	3,91

Vypočítané hodnoty deformací - KONTAKT - FRICTIONAL $f_t = 0,3$

	E_1	E_2	před.	stav	střed	žebro	vrtule	Zatížení kolejnice
	[MPa]	[MPa]	[N]		[mm]	[mm]	[mm]	[N]
1	6,4	31,11	20329	1. zatěžovací stav	0,27	0,89	1,80	
				2. zatěžovací stav	0,33	0,96	1,88	23750
2	6,4	31,11	38000	1. zatěžovací stav	0,57	1,86	3,61	
				2. zatěžovací stav	2,69	3,04	3,90	23750
3	5,44	27,83	35390	1. zatěžovací stav	0,94	2,14	3,89	
				2. zatěžovací stav	3,13	3,40	4,02	23750
4	4	25	36000	1. zatěžovací stav	1,62	2,95	4,88	
				2. zatěžovací stav	1,87	3,23	5,20	23750
5	4	31,11	30000	1. zatěžovací stav	1,30	2,39	3,96	
				2. zatěžovací stav	1,46	2,57	4,18	23750
6	3,5	33	27500	1. zatěžovací stav	1,49	2,52	4,01	
				2. zatěžovací stav	1,67	2,73	4,27	23750
7	3,07	27,83	24400	1. zatěžovací stav	1,58	2,53	3,91	
				2. zatěžovací stav	3,36	3,57	4,02	14000
8	3	27,83	23600	1. zatěžovací stav	1,56	2,48	3,82	
				2. zatěžovací stav	2,97	3,29	3,89	11000
9	2,9	27,83	23600	1. zatěžovací stav	1,68	2,61	3,96	
				2. zatěžovací stav	3,00	3,37	4,03	10000
10	2,9	27,83	23300	1. zatěžovací stav	1,64	2,55	3,87	
				2. zatěžovací stav	2,80	3,22	3,94	8800
11	2,88	27,83	23300	1. zatěžovací stav	1,66	2,58	3,89	
				2. zatěžovací stav	2,80	3,23	3,97	8600
12	2,88	27,83	23300	1. zatěžovací stav	1,66	2,58	3,89	
				2. zatěžovací stav	2,73	3,19	3,97	8000
13	2,88	27,83	23300	1. zatěžovací stav	1,66	2,58	3,89	
				2. zatěžovací stav	2,64	3,14	3,96	7320

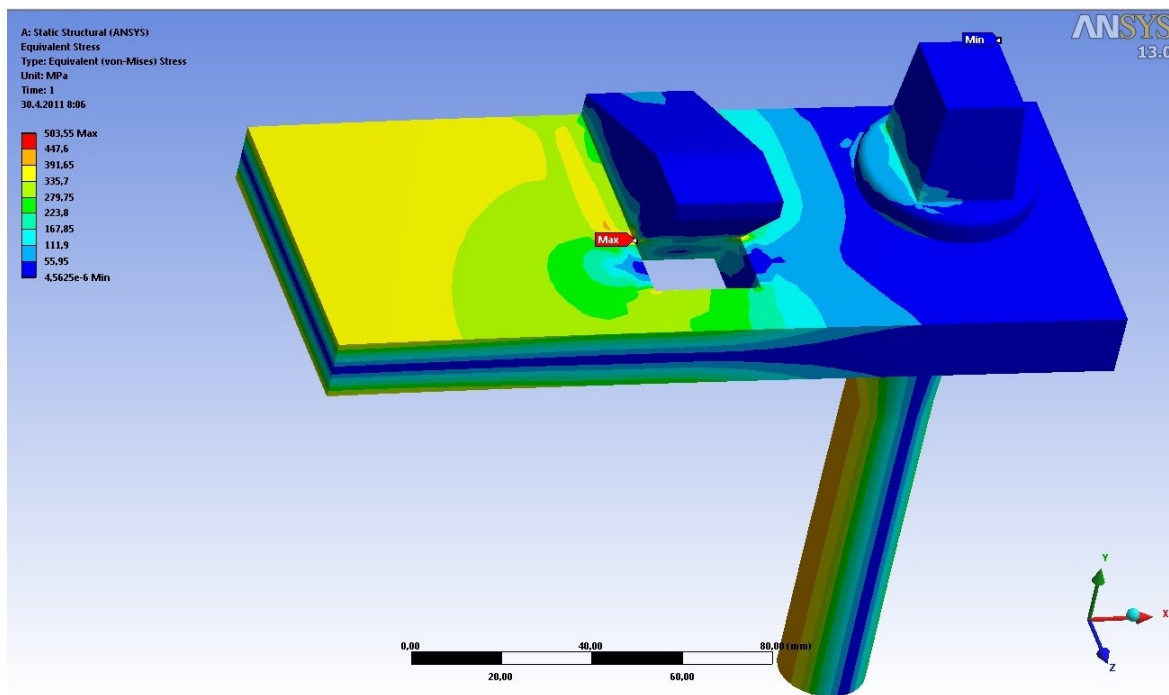
Výpočet napětí u prvního zatěžovacího stavu



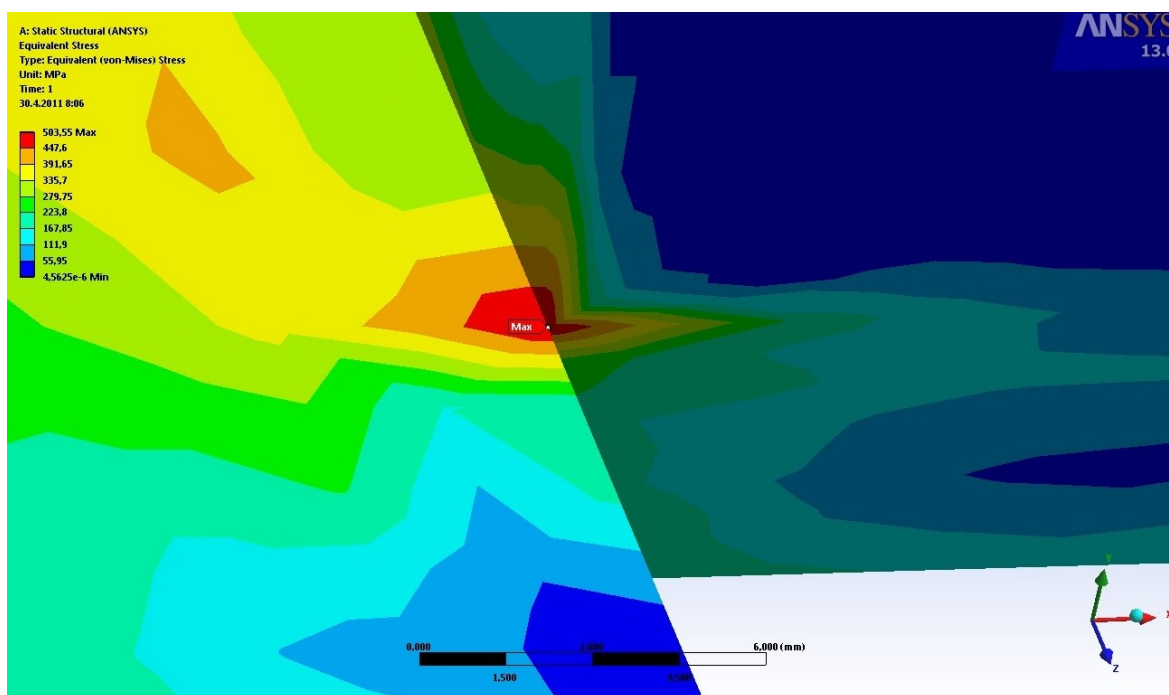
Obr. 6.15 – Konečný výpočet deformace podkladnice

Vypočtené deformace podkladnice s naměřenými deformacemi se shodují ve dvou místech na podkladnici. V místě žebra na podkladnici je deformace o 0,21 mm menší. Těchto deformací se dosáhlo dosazením za modul pružnosti $E_1 = 2,88 \text{ MPa}$ (pryž pod podkladnici) a za předpětí síla $F_p = 23\,300 \text{ N}$.

Grafické znázornění výsledků napětí podkladnice. Pro lepší viditelnost je na obr. 6.16 a 6.17 zobrazena jen podkladnice a pražcový šroub.



Obr. 6.16 - Napětí podkladnice v prvním zatěžovacím stavu

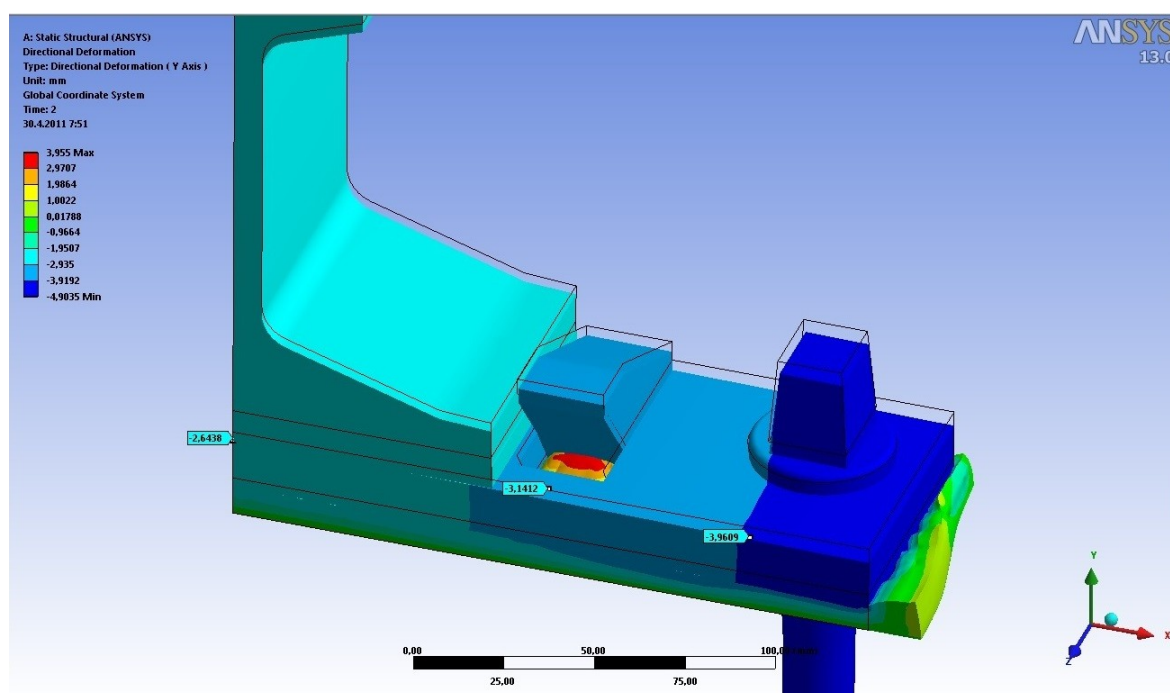


Obr. 6.17 – Detail napětí

Maximální hodnota napětí v prvním zatěžovacím stavu je zobrazeno na obr. 6.16 a 6.17.

$$\sigma = \underline{\underline{503,55 \text{ MPa}}}$$

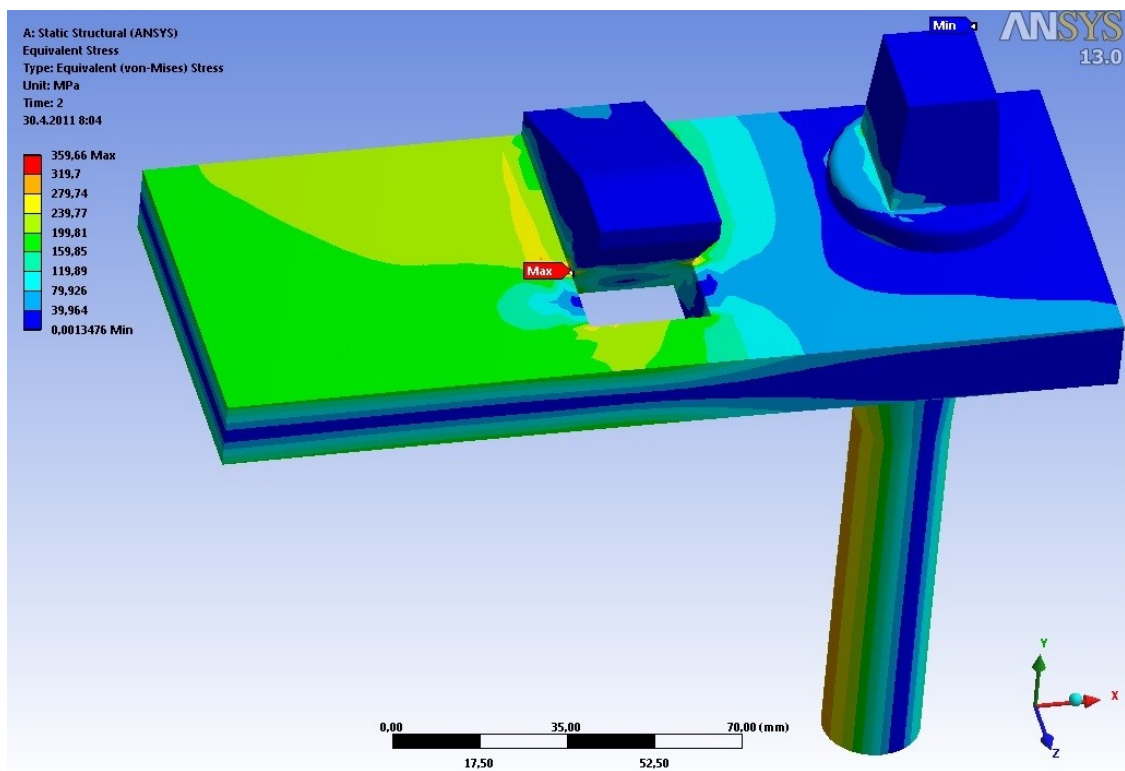
Výpočet napětí u druhého zatěžovacího stavu



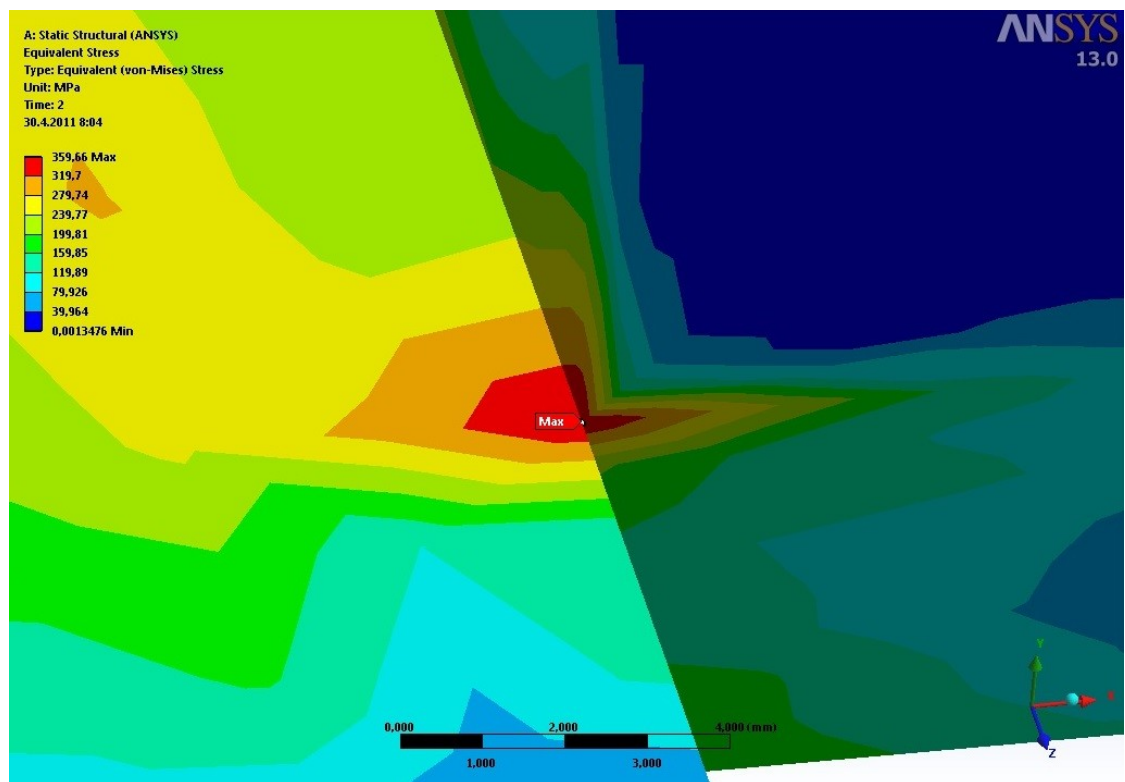
Obr. 6.18 - Deformace podkladnice v druhém zatěžovacím stavu

Pro zjištění napětí u druhého zatěžovacího stavu se měnily hodnoty modulu pružnosti pryže pod kolejnicí E_2 . Zatížení na kolejnici se snižovalo z důvodu malé tuhosti pryže pod podkladnicí.

Grafické znázornění výsledků napětí podkladnice. Na obr. 6.19 a 6.20 je zobrazena jen podkladnice a pražcový šroub. Zbytek součástí je skryto pro lepší zobrazení napětí.



Obr. 6.19 – Napěťový stav podkladnice v druhém zatěžovacím stavu



Obr. 6.20 – Detail napětí

Maximální hodnota napětí v druhém zatěžovacím stavu je zobrazeno na obr. 6.19 a 6.20.

$$\sigma := \underline{\underline{359,66 \text{ MPa}}}$$

7. Zhodnocení výsledků

Předpětí pražcového šroubu se počítalo na modelu, do kterého se dosadily vypočtené linearizované moduly pružnosti pryží. Vypočtený modul pružnosti pro pryžovou podložku pod pokladnici $E_1 = 5,44$ MPa a pro pryžovou podložku pod kolejnici $E_2 = 27,83$ MPa. Výsledné předpětí pražcového šroubu pro dvě počítané varianty kontaktů železničního svršku nemá shodný výsledek.

Tabulka 7. 1 – Předpětí v pražcovém šroubu

Kontakt	Předpětí [N]
BONDED - slepené	62 000
FRICTIONAL 0,3	35 390

Důvodem tohoto velkého rozdílu předpětí je volba kontaktu. U kontaktu, kdy podkladnice a pryž pod podkladnicí jsou k sobě slepené vyplývá, že pryž pod podkladnicí se nemůže v místě kontaktu při stlačování posouvat. Proto potřebujeme větší sílu pro stlačení podkladnice, aby dosáhla deformace v místě vrtule 3,89 mm. U třetího kontaktu při stlačování dochází k tření (ke klouzání) pryžové podložky pod podkladnicí po povrchu podkladnice. Z tohoto důvodu je silové předpětí potřebné k stlačení podkladnice v místě vrtule o 3.89 mm v pražcovém šroubu menší. Ve skutečnosti se bude předpětí ve šroubu přibližovat více k hodnotě 35 390 N, protože kontakt FRICTIONAL 0,3 přesněji demonstruje skutečné kontaktní vlastnosti železničního svršku.

V dalším bodě se počítalo napětí na podkladnici. Napětí v prvním zatěžovacím stavu pro kontakt, kdy je vše slepené je $\sigma_{B1} = 594,98$ MPa. Pro třetí kontakt je napětí $\sigma_{F1} = 503,55$ MPa. Rozdíl mezi σ_{B1} a σ_{F1} je 91,43 MPa. Tento rozdíl je způsoben různě dosaženými deformacemi v místě žebra na podkladnici.

Tabulka 7.2 – Deformace podkladnice a napětí v prvním zatěžovacím stavu

1. zatěžovací stav - Deformace

	Střed [mm]		Žebro [mm]		Vrtule [mm]		Napětí [mm]
Naměřené hodnoty fakultou strojní	1,66		2,79		3,89		
KONTAKT	V	R	V	R	V	R	
BONDED	1,66	0	2,52	0,27	3,89	0	594,98
FRICTIONAL 0,3	1,66	0	2,58	0,21	3,89	0	503,55
Vysvětlivky: V ... vypočtené deformace [mm] R ... rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými deformacemi [mm]							

Napětí v druhém zatěžovacím stavu pro kontakt BONDED je $\sigma_{B2} = 378,21$ MPa. Pro třecí kontakt je napětí $\sigma_{F2} = 359,66$ MPa. Rozdíl mezi σ_{B1} a σ_{F1} je 18,55 MPa. Opět nebylo v místě žebra a tentokrát i v místě vrtulí vypočteno přesných naměřených deformací.

Tabulka 7.3 – Deformace podkladnice a napětí v druhém zatěžovacím stavu

2. zatěžovací stav - Deformace

	Střed [mm]		Žebro [mm]		Vrtule [mm]		Napětí [mm]
Naměřené hodnoty fakultou strojní	2,64		3,28		3,91		
KONTAKT	V	R	V	R	V	R	
BONDED	2,63	0,01	3,13	0,15	3,96	-0,05	378,21
FRICTIONAL 0,3	2,64	0	3,14	0,14	3,96	-0,05	359,66
Vysvětlivky: V ... vypočtené deformace [mm] R ... rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými deformacemi [mm]							

Pro naměřené hodnoty fakultou strojní by napětí na podkladnici v obou zatěžovacích stavech bylo menší. Nepřesně vypočtené deformace v určitých místech podkladnice jsou důsledkem linearizace modulů pružností obou pryžových podložek, které ve skutečnosti mají vlastnosti nelineární.

8. Závěr

Bakalářská práce se zabývala statickou deformací a namáháním předepnuté železniční podkladnice pro dva zatěžovací stavy, které vzniknou důsledkem utažení podkladnice a přejezdem vozidla po kolejnici. Na začátku práce byla vysvětlena funkčnost podkladnice a podrobné popsání vzniklých zatěžovacích stavů. Následně byl popsán experiment určení modulu pružnosti pryží a předpětí v pražcových šroubech. Výpočet tuhostí pryží se provedl ze zkoušek statických parametrů pryžových podložek provedených na fakultě strojní. Vypočtený linearizovaný modul pružnosti pro pryžovou podložku pod podkladnicí $E_1 = 5,44 \text{ MPa}$ a modul pružnosti pryžové podložky pod kolejnici $E_2 = 27,83 \text{ MPa}$.

V další části této práce se počítalo předpětí a napětí železniční podkladnice pro dvě varianty modelů, a to v prvním modelu, ve kterém byly všechny kontakty slepené (BONDED) a druhý model, kde mezi jednotlivými částmi železničního svršku dochází ke tření s koeficientem tření 0,3 (FRICTIONAL 0,3). Výsledné předpětí šroubu odpovídající utahovacímu momentu 200 Nm pro variantu BONDED $F_{p1} = 62\,000 \text{ N}$ a pro variantu FRICTIONAL 0,3 vyšlo $F_{p2} = 35\,390 \text{ N}$. Zhodnocení těchto dvou výsledků viz výše. Dále v prvním zatěžovacím stavu, kdy jsou utaženy pražcové šrouby utahovacím momentem 200 Nm, a kolejnice je nezatížená, je napětí na podkladnici nejvyšší. U první varianty BONDED je nejvyšší vzniklé napětí v místě žebra $\sigma_{B1} = 594,98 \text{ MPa}$ a u druhé varianty FRICTIONAL 0,3 je nejvyšší napětí v místě žebra $\sigma_{F1} = 503,55 \text{ MPa}$. V druhém zatěžovacím stavu, kdy jsou utaženy pražcové šrouby utahovacím momentem 200 Nm a kolejnice je zatížená silou 95 kN, jsou napětí oproti prvnímu zatěžovacímu stavu menší. Pro první variantu BONDED bylo nejvyšší napětí vypočítáno v místě žebra, a to $\sigma_{B2} = 378,21 \text{ MPa}$ a pro druhou variantu FRICTIONAL 0,3 je nejvyšší vypočtené napětí v místě žebra $\sigma_{F2} = 359,66 \text{ MPa}$. Napětí v obou zatěžovacích stavech jsou vyšší než napětí na podkladnici vzniklé ve skutečnosti. Nepřesné určení napětí vzniklé na podkladnici pomocí programu Ansys je způsobeno nedosažením přesných deformací v určitých místech podkladnice. Za vypočítání nepřesných deformací na třech místech na podkladnici může pryž, která se kvůli zjednodušení výpočtu nahradila lineárním prvkem. Tudíž její vlastnosti jsou jiné než ve skutečnosti, proto se nedosáhlo přesných výsledků napětí na podkladnici.

Seznam použité literatury

- [1] NĚMČEK, Miloš. *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů: Spoje*. Dotisk 2. vydání. VŠB-TU Ostrava, 2009. 114 s. ISBN 978-80-248-1782-8
- [2] *WIKIPEDIA*.
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Podkladnice>> [cit. 2011-03-18].
- [3] *WIKIPEDIA*.
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99en%C3%AD>> [cit. 2011-03-04].
- [4] *WIKIPEDIA*.
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlezni%C4%8Dn%C3%AD_svr%C5%A1ek> [cit. 2011-04-28].
- [5] *INSTITUT DOPRAVY*, VŠB-TU OSTRAVA.
URL: <http://www.id.vsb.cz/pol25/Polak_DaMZ_3_NP.pdf> [cit. 2011-03-18].
- [6] *ISES*.
URL: <http://www.ises.info/old-site/clanky_pdf/ROJKO-Rackovasobrporecenzi.pdf> [cit. 2011-03-04].
- [7] *Vysoké učení technické v Brně*.
URL: <http://www.fce.vutbr.cz/zcl/plasek.o/studium/7_Upevneni.pdf> [cit. 2011-03-18].
- [8] *Index of /mahdalova/doprstav*.
URL: <<http://fast10.vsb.cz/mahdalova/doprstav/pred11fs.pdf>> [cit. 2011-03-18].
- [9] *TRINECKÉ ŽELEZÁRNY*.
URL: <<http://www.trz.cz/vyrd/E9286AC83FD8BEABC125701C0033795B>> [cit. 2011-03-18].
- [10] *Gumárny Zubří*.
URL: <<http://www.guzu.cz/index.php?view=technicka-pryz-plasty-a-tpe&display=vlastni-vyroby&lang=cz>> [cit. 2011-04-15].
- [11] *Správa železniční dopravní cesty*.
URL: <<http://www.szdc.cz/o-nas/zeleznice-cr/historie-zeleznice/zeleznici-svrsek/bezna-kolej-3.html>> [cit. 2011-04-15].
- [12] *Správa železniční dopravní cesty*.
URL: <<http://www.szdc.cz/o-nas/zeleznice-cr/historie-zeleznice/zeleznici-svrsek/bezna-kolej-2.html>> [cit. 2011-04-15].
- [13] *WIKIPEDIA*.
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlezni%C4%8Dn%C3%AD_doprava> [cit. 2011-04-28].

Přílohy

Tabulky vypočtených hodnot deformací pro jednotlivé kontakty mezi prvky soustavy.

Naměřené hodnoty

	Střed [mm]	Žebro [mm]	Vrtule [mm]
1. zatěžovací stav	1,66	2,79	3,89
2. zatěžovací stav	2,64	3,28	3,91

Vypočítané hodnoty deformací - KONTAKT - FRICTIONAL $f_t = 0,2$

	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	před. [N]	stav	střed [mm]	žebro [mm]	vrtule [mm]
1	6,4	31,11	20329	1. zatěžovací stav	0,60	1,28	2,25
				2. zatěžovací stav	0,71	1,40	2,39
2	6,4	31,11	34000	1. zatěžovací stav	1,12	2,27	3,93
				2. zatěžovací stav	1,41	2,60	4,33
3	4	25	24000	1. zatěžovací stav	1,73	2,64	3,94
				2. zatěžovací stav	2,09	3,02	4,36
4	4,5	31,11	26750	1. zatěžovací stav	1,60	2,58	4,00
				2. zatěžovací stav	1,98	2,99	4,44
5	4,3	31,11	25500	1. zatěžovací stav	1,66	2,62	4,00
				2. zatěžovací stav	2,01	2,98	4,38
6	4	31,11	23500	1. zatěžovací stav	1,69	2,59	3,87
				2. zatěžovací stav	2,06	2,97	4,27
7	4	36	23580	1. zatěžovací stav	1,70	2,60	3,88
				2. zatěžovací stav	2,07	2,98	4,29
8	3,9	36	23240	1. zatěžovací stav	1,81	2,70	3,98
				2. zatěžovací stav	2,11	3,02	4,31
9	3,7	36	22700	1. zatěžovací stav	1,74	2,63	3,91
				2. zatěžovací stav	2,21	3,10	4,38
10	7	24	33800	1. zatěžovací stav	1,12	2,25	3,98
				2. zatěžovací stav	3,31	3,50	4,02
11	8	24	37200	1. zatěžovací stav	0,95	2,14	3,89
				2. zatěžovací stav	2,96	3,28	4,00
12	9	24	40400	1. zatěžovací stav	0,80	2,05	3,88
				2. zatěžovací stav	2,71	3,11	3,94
13	9,5	24	42200	1. zatěžovací stav	0,74	2,02	3,89
				2. zatěžovací stav	2,61	3,06	3,98

Vypočítané hodnoty deformací - KONTAKT - FRICTIONLESS

	E ₁	E ₂	před.	stav	střed	žebro	vrtule
	[MPa]	[MPa]	[N]		[mm]	[mm]	[mm]
1	6,4	31,11	20329	1. zatěžovací stav	1,97	2,73	3,81
				2. zatěžovací stav	5,00	4,52	3,97
2	7,5	31,11	23500	1. zatěžovací stav	1,82	2,66	3,88
				2. zatěžovací stav	4,64	4,34	4,04
3	8,5	24	26000	1. zatěžovací stav	1,66	2,58	3,89
				2. zatěžovací stav	4,34	4,16	4,05
4	9,5	24	28300	1. zatěžovací stav	1,52	2,49	3,89
				2. zatěžovací stav	4,04	3,95	4,03
5	11	24	31700	1. zatěžovací stav	1,34	2,38	3,89
				2. zatěžovací stav	3,68	3,76	4,03
6	12	24	33900	1. zatěžovací stav	1,24	2,33	3,90
				2. zatěžovací stav	3,48	3,65	4,04
7	13	24	35950	1. zatěžovací stav	1,14	2,27	3,89
				2. zatěžovací stav	3,29	3,53	4,03
8	14	24	38000	1. zatěžovací stav	1,05	2,22	3,89
				2. zatěžovací stav	3,12	3,43	4,02
9	15	24	40000	1. zatěžovací stav	0,97	2,16	3,89
				2. zatěžovací stav	2,95	3,31	4,02
10	16,5	24	42800	1. zatěžovací stav	0,85	2,09	3,89
				2. zatěžovací stav	2,74	3,20	4,00
11	17	24	43800	1. zatěžovací stav	0,82	2,07	3,89
				2. zatěžovací stav	2,67	3,16	4,00
12	17,1	24	44000	1. zatěžovací stav	0,81	2,06	3,89
				2. zatěžovací stav	2,64	3,15	4,00

Vypočítané hodnoty deformací - KONTAKT - FRICTIONAL $f_t = 0,1$

	E_1	E_2	před.	stav	střed	žebro	vrtule
	[MPa]	[MPa]	[N]		[mm]	[mm]	[mm]
1	6,4	31,11	20329	1. zatěžovací stav	1,22	1,96	3,02
				2. zatěžovací stav	3,94	3,55	3,18
2	6,4	31,11	25550	1. zatěžovací stav	1,60	2,54	3,88
				2. zatěžovací stav	4,39	4,17	4,05
3	7	24	27200	1. zatěžovací stav	1,52	2,49	3,89
				2. zatěžovací stav	4,16	4,03	4,08
4	8	24	30500	1. zatěžovací stav	1,35	2,39	3,89
				2. zatěžovací stav	3,85	3,86	4,09
5	9	24	32850	1. zatěžovací stav	1,20	2,30	3,88
				2. zatěžovací stav	3,51	3,63	4,01
6	10	24	35750	1. zatěžovací stav	1,06	2,22	3,89
				2. zatěžovací stav	3,17	3,43	4,02
7	11	24	38250	1. zatěžovací stav	0,95	2,14	3,89
				2. zatěžovací stav	2,93	3,28	4,00
8	12,5	24	42100	1. zatěžovací stav	0,79	2,06	3,89
				2. zatěžovací stav	2,61	3,06	3,95